

ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

6 16



Главный редактор  
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора  
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурич**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A. Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T. Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E. Koonin**, США), академик, доктор геологоминералогических наук **Н.П.Лаверов**, доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор физико-математических наук **Л.Д.Фаддеев**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ И ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦАХ ОБЛОЖКИ. Портрет А.М.Прохорова из галереи выдающихся ученых Физического института имени П.Н.Лебедева РАН и его кабинет в Институте общей физики имени А.М.Прохорова РАН.

Фото М.Е.Коньжева



«Наука»

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2016  
ФГУП «Академиздатцентр «Наука», 2016  
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2016

Специальный выпуск  
**К 100-ЛЕТИЮ**  
**АЛЕКСАНДРА МИХАЙЛОВИЧА ПРОХОРОВА**

## В НОМЕРЕ:

### 3 ВСЕГДА НА ГРЕБНЕ ВОЛНЫ

**4 Прохоров А.М.**  
**Чем наука отличается**  
**от рыбной ловли**

#### ЖИЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

**6**  
**Хроника: 1916–2002**

**14 Прохорова Г.А.**  
**Первая глава**

#### ЖИЗНЬ ИДЕЙ

**22 Андреев С.Н., Кочиев Д.Г., Шафеев Г.А., Щербаков И.А.**  
**Светогидравлический эффект**  
**Прохорова–Аскарьяна–Шипуло**

*Эффект, открытый Прохоровым и соавторами более 50 лет назад и изученный, казалось бы, весьма подробно, продолжает демонстрировать все новые грани. Их осмысление позволяет надеяться на создание новых технологий в самых передовых отраслях человеческой деятельности. Что-то уже реализовано, а что-то еще ждет своего воплощения в жизнь.*

**31 Дианов Е.М.**  
**Отечественная волоконная оптика:**  
**остановленный взлет**

*По инициативе А.М.Прохорова в нашей стране были начаты исследования и создана технология производства волоконных световодов, лазеров, датчиков. Почему же разработки не воплотились в промышленное производство?*

**41 Щелев М.Я.**  
**Фотоэлектронная «лупа времени»**

*Разработка методов и средств регистрации изображений быстропротекающих процессов с временным разрешением от миллисекунд до фемтосекунд имеет 150-летнюю историю. С помощью времяанализирующих электронно-оптических преобразователей удается получать уникальную информацию в различных областях экспериментальной физики.*

**54 Халили Ф.Я.**  
**Лазерная интерферометрия:**  
**за занавесом триумфа**

*Гравитационные волны, предсказанные Общей теорией относительности около ста лет назад, в сентябре 2015 г. были впервые зарегистрированы напрямую. Этот успех обеспечен невероятным уровнем чувствительности современных лазерных интерферометров: последний настолько высок, что в значительной степени определяется квантовыми эффектами.*

**62 Буланов С.В.**  
**Релятивистские плазменные зеркала**  
*Тонкие электронные или электронно-ионные слои, разогнанные лазерным светом до релятивистских скоростей, способны изменять частоту взаимодействующих с ними фотонов. Это открывает возможности создать источники жесткого излучения большой яркости и компактные ускорители ионов.*

**70 Вартапетов С.К., Щербаков И.А.**  
**Лазеры – зрению**  
*Глаз оказался идеальным объектом для воздействия лазерного луча. Среди разнообразных офтальмологических операций, проводимых с помощью лазера, на первом месте остается рефракционная коррекция.*

#### ЖИЗНЬ ПАМЯТИ

**80 Фортов В.Е.**  
**Такая замечательная жизнь**

**82 Алферов Ж.И.**  
**Штрихи воспоминаний**

**85 Бункин Ф.В.**  
**Александр Михайлович был**  
**смелым человеком**

**87 Таунс Ч.**  
**Александр Михайлович Прохоров**

**88 Прохоров А.К.**  
**Несколько слов о моем дедушке**

**92 Дианов Е.М.**  
**Австралия помнит**

Special Issue

**TO THE CENTENARY  
OF ALEXANDER MIKHAILOVICH PROKHOROV**

**CONTENTS:**

**3 ALWAYS ON THE WAVE CREST**

**4 Prokhorov A.M.  
How the Science Is Different  
from Fishing**

**THE LIFE OF A MAN**

**6  
Chronicle: 1916–2002**

**14 Prokhorova G.A.  
The First Chapter**

**THE LIFE OF IDEAS**

**22 Andreev S.N., Kochiev D.G., Shafeev G.A.,  
Shcherbakov I.A.  
Photohydraulic Effect  
by Prokhorov-Askar'yan-Shipulo**

*This effect discovered by A.M.Prokhorov and co-authors more than fifty years ago and studied apparently in great detail still continue to demonstrate surprisingly new features. Their understanding gives hope for the development of new technologies in the most advanced fields of human activity. Something has already been implemented, but something is still waiting for its implementation.*

**31 Dianov E.M.  
Russian Fiber Optics:  
Stopped Takeoff**

*At the initiative of A.M.Prokhorov in our country have been initiated research and developed production technology of optical fibers, lasers, sensors. Why these results were not embodied in industrial production?*

**41 Schelev M.Ya.  
Photoelectronic  
«Time Magnifying Glass»**

*Development of methods and instruments for image recording of ultrafast events with millisecond to femtosecond time resolution has 150-years history. The unique information in various fields of experimental physics can be obtained by using the image-tube technologies.*

**54 Khalili F.Ya.  
Laser Interferometry:  
Behind the Curtain of Triumph**

*In September 2015, gravitational waves predicted by the General Relativity a century ago were directly detected for the first time. This achievement was enabled by the incredible sensitivity level of the contemporary laser interferometers, which is to a major extent limited by quantum effects.*

**62 Bulanov S.V.  
Relativistic Plasma Mirrors**

*Thin electron or electron ion layers accelerated by the laser light to relativistic velocities can change the frequency of photons interacting with them. This opens a way towards developing the sources of high brightness high-energy electromagnetic radiation and towards developing compact ion accelerators.*

**70 Vartapetov S.K., Shcherbakov I.A.  
Lasers in Ophthalmology**

*The eye is an ideal object for laser beam treatment. Refraction surgery remains the most frequent among various ophthalmic surgery conducted with laser.*

**LIFE OF THE MEMORY**

**80 Fortov V.E.  
Such a Remarkable Life**

**82 Alferov Zh.I.  
Touches of Memories**

**85 Bunkin F.V.  
Alexander Mikhailovich  
Was a Courageous Man**

**87 Townes Ch.  
Alexander Mikhailovich Prokhorov**

**88 Prokhorov A.K.  
A Few Words about My Grandfather**

**92 Dianov E.M.  
Australia Remembers**

# Всегда на гребне волны

11 июля 2016 г. исполняется 100 лет со дня рождения академика Александра Михайловича Прохорова, лауреата Ленинской и Государственных премий, дважды Героя Социалистического Труда. Первое, что приходит на ум в связи с его именем, — Нобелевская премия по физике, которую он получил в 1964 г. вместе с Николаем Геннадьевичем Басовым и Чарлзом Таунсом «за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию лазеров и мазеров». Гораздо менее известно, что Прохоров — не только один из основоположников квантовой электроники и лазерной физики. Круг научных интересов ученого был намного шире. В него входили радиофизика и радиоспектроскопия, физика ускорителей, интегральная оптика, оптическая связь на волоконных световодах, спектроскопия сверхвысокого разрешения, микроэлектроника, применение лазеров в медицине и экологии, физика магнитных явлений, физика тонких пленок и физика поверхностей, разработка приборов для наблюдения сверхбыстрых процессов, адаптивная оптика и др. И в каждую из областей, будь то распространение радиоволн, молекулярные стандарты частоты, квантовые усилители, рост кристаллов, технология сверхпрочных материалов или процессы в плазме, Прохоров внес весомый вклад. У него было особое чутье на все новое, неисчерпаемая энергия, чтобы воплощать задуманное, и редкостный дар собирать вокруг себя талантливых единомышленников. Узнать об этом подробно, из «первых рук» его многочисленных соратников, можно из прекрасной книги «Александр Михайлович Прохоров. Воспоминания, статьи, интервью, документы», изданной «Физматлитом» в 2006 г. (вот только в продажу она не поступала, так что искать ее надо в очень ограниченном числе библиотек).

Наша редакция, конечно, не ставила перед собой цель представить наследие Александра Михайловича исчерпывающим образом, а старалась сконцентрироваться на менее известных страницах. Но мы все же надеемся, что с помощью его ближайших коллег сумели донести до читателя главную мысль: этот человек, Ученый с большой буквы, ни-

когда не останавливался на достигнутом. Занимая ответственные посты, своим главным рабочим местом он всегда считал институтский кабинет, и его научная мысль не знала остановок. Но при этом ко всем своим многочисленным обязанностям он относился с предельной ответственностью. Так, будучи председателем Научно-редакционного совета издательства «Советская энциклопедия», он вникал во все тонкости работы. В частности, ему пришлось бороться за то, чтобы в Большую советскую энциклопедию была включена статья об Андрее Дмитриевиче Сахарове. Вот как Александр Михайлович сам вспоминал об этом в интервью, данном телеканалу «Культура» в 2001 г.:

*Я признаюсь, что были большие трудности, когда я был главным редактором Большой советской энциклопедии, которая имела большой успех не только у нас, но и за границей. Когда мы дошли до буквы С — академика А.Д. Сахарова, мне было сказано сотрудником М.А. Сулова, что статья про него не надо включать в энциклопедию. Но я сказал: «Надо, потому что Сахаров — академик. Это будет нарушением традиций». Велись споры, многие были недовольны. Нам было предложено не писать, что Сахаров — трижды Герой Социалистического Труда. Но как я мог об этом не написать, если так было в действительности. Статья все же появилась в БСЭ. Все ждали — и у нас, и за рубежом, — выйдет статья или нет? Вышла...*

Что же касается научных исследований, которые у Прохорова всегда были главным приоритетом, то его занимали не только собственные (и его учеников) работы, но и положение с наукой в стране. Настоящий патриот в самом высоком значении этого слова, он лучше кого бы то ни было понимал роль науки в жизни общества и государства. До самых последних дней Александр Михайлович боролся за ее будущее, выступая как публицист, пытаясь достучаться до высших управленческих сфер. Доказательством может служить та небольшая заметка, которую в какой-то степени можно назвать завещанием ученого. С нее мы и хотим начать наш юбилейный номер: высказанные там мысли более чем актуальны сегодня.

# Чем наука отличается от рыбной ловли

Александр Прохоров,  
лауреат Нобелевской премии

Если бы я вновь поднялся на нобелевскую трибуну, то говорил бы о том, что самая важная проблема, которая стоит перед человечеством, — это экология. Мы на пороге климатической катастрофы. Надо создавать новые технологии, чистое производство, развивать медицину на экологических принципах. Климат меняется, в природе происходят мутации. И если человек желает сохраниться как биологический вид, ему надо не теряя времени готовиться к этим изменениям.

Единственное изобретение, которое не нужно в науке, — это колесо. А в дальнейшем ни одно направление в человеческой деятельности без науки не обходилось. По мере прогресса новшества становятся все сложнее, теоретическая база усложняется. Страна, которая не занимается наукой, обречена на прозябание. Даже те государства, где науки не было в помине, сейчас пытаются ее развивать. Но возникает проблема: где взять ученых и на какой базе развивать технологии? Этого не купишь ни за какие деньги. Поэтому положение России остается выгодным, хотя мы сами себе насоздавали кучу проблем.

Что находят ученые в науке? Это своего рода болезнь. Что может быть увлекательнее, чем познавать неизвестное? Радость открытия не проходит никогда. Когда я получил «нобеля», академик Скобельцин спросил: «Дальше вы работать не будете?». До сих пор работаю. Ученый трудится в первую очередь для собственного удовольствия. Но он должен знать, что работа полезна обществу. Этим наука отличается от рыбной ловли, которая тоже бывает увлекательной.

В современном мире знания становятся производительной силой. Невозможно развивать высокие технологии, если не развивается фундаментальная наука. Наука и промышленность — сиамские близнецы, которые не могут существовать один без другого. И очень плохо, что за последние

годы в России не построено ни одного нового высокотехнологического производства. Создавая лазеры, мы работали исключительно на отечественных приборах. Нобелевская работа Алферова выросла из того же направления и, следовательно, тоже тесно связана с нашей промышленностью.

Борьба за политическое влияние — это и борьба за высокие технологии. И потому конкуренты всячески препятствуют их развитию в России. Знаю немало случаев, когда мы могли взять кредит на современное производство, но этому исподволь мешали. Нам дают деньги на сельское хозяйство, но никогда — на высокие технологии.

Считается, что ведущее в мировой науке место занимают США. И в доказательство приводят тот факт, что львиная доля Нобелевских премий отправляется в эту страну. США переманивают к себе лучшие умы со всего мира. И подкармливают всех, кто имеет отношение к выдвижению. Приглашают читать лекции — и платят недурственные деньги. Кто девушку ужинает, тот ее и танцует. Недавний пример — прокатили с Нобелевской премией физика Летохова, хотя его приоритет признают сами же американцы. И это ложь, что его не выдвигали! Я выдвигал, и другие голоса знаю.

Без науки цивилизация погибнет. Как ни странно, не все это понимают. И не понимают именно те, от кого многое зависит. Американцы дают конкурентов, собирают у себя все таланты. Но планета едина — и не решенные в одних регионах экологические, климатические, демографические, медицинские проблемы ударят бумерангом по самым процветающим странам. В современном мире жить изолированно и счастливо невозможно и просто опасно.

И все-таки отношение к науке неуклонно улучшается. И молодежь пошла в технические вузы. Мода на юристов схлынула. Зачем юристы в таком количестве? Только чтобы акт о капитуляции грамотно составить. На исправление ошибок нам отпущено совсем немного. Еще пять лет — и можно распрощаться с мечтой о достойном месте России. ■

Статья была опубликована в газете «Известия» 7 декабря 2000 г.

© Прохоров А.М., наследники, 2016

# ***Жизнь человека***



Академик Александр Михайлович Прохоров, лауреат Нобелевской премии по физике и Ленинской, Государственных премий, дважды Герой Социалистического Труда.

## Хроника: 1916–2002

**1916.** Александр Михайлович Прохоров родился 11 июля в г.Атертоне (штат Квинсленд на северо-востоке Австралии) в семье политэмигрантов из России, которые занимались фермерством. Отец, Михаил Иванович Прохоров (1882–1941), — рабочий родом из Мариуполя. Мать, Мария Ивановна Прохорова, урожденная Михайлова (1882–1944), — тоже из семьи рабочих. Родители поженились на родине Марии Ивановны, в Оренбурге, в 1905 г. Михаил Иванович за революционную деятельность был выслан на вечное поселение в Сибирь, откуда бежал, нелегально переехал с семьей в Австралию и в 1912 г. поселился в русской колонии. К тому времени у Прохоровых было уже две дочери, третья родилась в Австралии в 1914 г.

**1922.** Поступил в школу близ местечка Бутчерс Крик, где учились его сестры. Через год в семье Прохоровых произошла первая трагедия: умерла от воспаления легких старшая дочь.

**1923.** Вместе с родителями и двумя сестрами покидает Австралию и через Шанхай, Владивос-

ток, Оренбург переезжает в Ташкент, где отец получил работу в Музее революции. Смерть второй сестры от столбняка. Учится в русской школе.

**1930.** Родители увозят обоих детей в Ленинград, там Александр оканчивает седьмой класс. Поступает на рабфак Ленинградского электротехнического института имени В.И.Ульянова (Ленина).

**1934–1939.** Учеба на физическом факультете в Ленинградском государственном университете, где был очень сильный преподавательский состав: С.Э.Фриш, М.П.Бронштейн, В.А.Фок, Е.Ф.Гросс, Ю.А.Крутков, П.И.Лукирский, М.А.Ельяшевич, Б.С.Джелепов, Э.В.Бурсиан и др. (в 1937–1938 гг. многие профессора были репрессированы, впоследствии реабилитированы). Получил диплом с отличием.

**1939.** Поступил в аспирантуру Физического института имени П.Н.Лебедева (ФИАН) в Москве. Экзамен по физике принимали И.Е.Тамм, Г.С.Ландсберг, Н.Д.Папалекси, Н.Н.Андреев. Аспирантуру под руководством В.В.Мигулина, будущего академика, проходил в лаборатории колебаний, ко-



Александр с родителями и сестрой Женей. 1925 г.

В номере использованы фотографии из семейного архива



тору возглавляли академики Н.Д.Папалекси и Л.И.Мандельштам. Тема работы — распространение радиоволн вдоль земной поверхности и их использование для измерения расстояний с большой точностью. Предложил оригинальный способ исследования ионосферы с помощью радиоинтерференционного метода.

**1940.** Познакомился со своей будущей женой Галиной Алексеевной Шелепиной (1913–1993) — аспиранткой географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Поженились 3 августа 1941 г. Позднее она напишет книгу воспоминаний «Луч надежды».

**1941.** В середине июля был призван в армию в звании младшего лейтенанта, так как прошел в университете подготовку в войсках зенитной артиллерии. Военкомат послал его на курсы разведчиков. 7 ноября 1941 г. был направлен в распоряжение штаба Западного фронта. В декабре 1941 г. в блокадном Ленинграде умирает отец Михаил Иванович, о чем сын узнает только в 1942 г.

**1941–1944.** Участие в боях Северо-Западного и Западного фронтов. Помощник начальника штаба полковой разведки. Два боевых ранения. Лечение в госпиталях. Демобилизован в звании старшего лейтенанта в связи с тяжелым ранением.

**1944.** В феврале возвращается в очную аспирантуру ФИАН. Обращается с письмом к И.В.Сталину, чтобы узнать о судьбе матери. Через месяц получает известие о смерти Марии Ивановны в 1944 г. в эвакуации (г.Туркестан Казахской ССР).

**1945.** 14 июля в семье родился сын Кирилл.

**1946.** Награжден медалями «За отвагу», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Защита кандидатской диссертации «Стабилизация частоты лампового генератора в теории малого параметра» под руководством С.М.Рытова, будущего члена-корреспондента АН СССР. Принят на работу в ФИАН в лабораторию колебаний на должность старшего научного сотрудника.

**1948.** Президиумом АН СССР присуждена премия имени Л.И.Мандельштама за лучшие работы в области радио за 1947 г. (совместно с С.М.Рытовым и М.Е.Жаботинским).

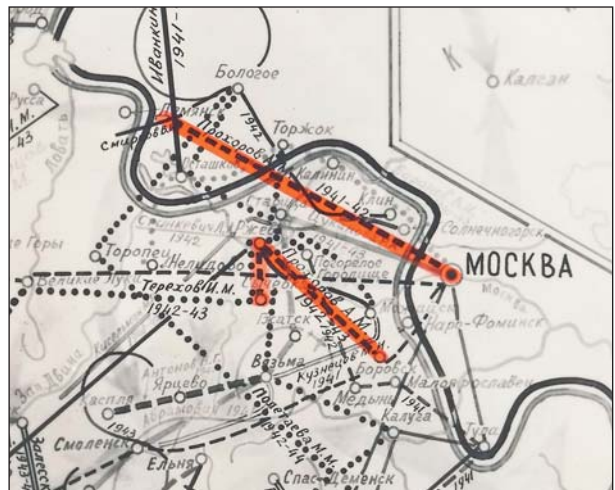
**1948–1951.** По предложению В.И.Векслера и при поддержке С.И.Вавилова начал исследовать возможность генерации миллиметровых волн с помощью синхротрона. Изучает когерентные свойства магнитотормозного синхротронного излучения релятивистских электронов, движущихся в однородном магнитном поле ускорителя. В результате экспериментально доказана когерентность этого излучения и определены основные характеристики источника: уровень мощности и размеры электронных сгустков. Защита докторской диссертации «Синхротронное излучение электронов в циклотроне в сантиметровом диапазоне волн».



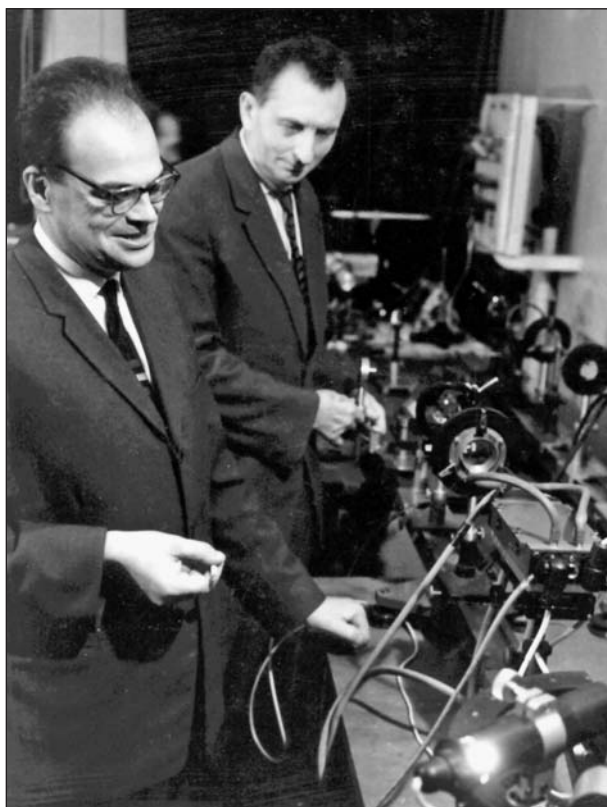
С женой в госпитале. 1942 г.

**1952.** В сентябре назначен заведующим сектором лаборатории колебаний ФИАН.

**1952–1958.** Публикация основополагающих работ, которые привели к созданию мазера и лазера и положили начало новым направлениям в исследованиях. С группой молодых сотрудников (Н.Г.Ба-



Фронтовые дороги А.М.Прохорова.



В лаборатории вместе с Н.Г.Басовым.

совым, А.И.Барчуковым, А.А.Маненковым, Н.А.Ирисовой, Т.М.Муриной, Г.Я.Зуевой, В.К.Конюховым, П.П.Пашининым) начинает заниматься спектроскопией газов и электронным парамагнитным резонансом (использовалась отечественная СВЧ-аппаратура, разработанная для целей радиолокации и радиотехники). В микроволновой спектроскопии, которая дает информацию о структуре молекул, дипольных моментах и ядерных спинах, Прохоров стал работать с молекулярными пучками, чтобы устранить уширение линий за счет эффекта Доплера первого порядка и увеличить разрешение. Родилась идея создать генераторы электромагнитных волн на совершенно новом принципе — с использованием стимулированного излучения, теоретически предсказанного А.Эйнштейном в 1916 г. Вместе с Басовым предложил использовать трехуровневую систему и обеспечить инверсию заселенности путем накачки вспомогательным электромагнитным излучением. В области парамагнитного резонанса было выбрано направление по изучению оксидных кристаллов с примесью различных парамагнитных ионов. Результаты в дальнейшем пригодились для развития лазеров на твердом теле. Здесь ключевым моментом была мысль Александра Михайловича использовать открытый резонатор в виде двух параллельных зеркальных поверхностей для генераторов субмиллиметрового и оптического диапазона.

**1954.** В апреле назначен заведующим лабораторией колебаний ФИАН.

**1954–1995.** Профессор Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

**1955.** Первая зарубежная поездка: командировка в Англию на Международную конференцию по радиоспектроскопии.

**1959.** Присуждена Ленинская премия за разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн (создание молекулярных генераторов и усилителей) совместно с Н.Г.Басовым.

Участие в I Международной конференции по квантовой электронике в США.

**1960.** Избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

**1961.** Встречается с Нильсом Бором во время его визита в ФИАН.

С конца 50-х годов научные интересы Прохорова смещаются в область оптического диапазона, а после запуска Т.Мейманом первого рубинового лазера в 1960 г. Александр Михайлович полностью переключается на поиски новых твердотельных активных сред для лазеров. В том же году был запущен первый газовый (неон-гелиевый) лазер, а в 1962 г. — полупроводниковый. С того времени начинается бурное развитие лазерной физики — от синтеза новых оптических материалов для генерации и преобразования излучения до исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом. Необходимо было организовать поиск новых материалов во всех агрегатных состояниях: твердом (кристаллы и стекла), жидком, газообразном и плазменном, обладающих подходящими для генерации схемами энергетических уровней и скоростями релаксации в различных диапазонах — от дальнего инфракрасного до видимого и ультрафиолетового. Встал вопрос о нелинейных элементах для преобразования частоты излучения и управления их пространственно-временными параметрами.

**1963.** Развил первую качественную теорию лазеров с модулированной добротностью; с помощью созданных под его руководством мощных твердотельных лазеров были начаты (совместно с П.П.Пашининым и др.) исследования оптического пробоя газов, которые открыли большую серию работ по лазерной искре, высокотемпературной лазерной плазме и лазерному термоядерному синтезу. Вместе с сотрудниками разработал новый принцип действия генераторов с использованием двухквантовых переходов.

**1964.** Присуждена Нобелевская премия по физике за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию лазеров и мазеров (совместно с Н.Г.Басовым и Ч.Таунсом).

В лаборатории колебаний с самого начала (с 1934 г., под руководством В.В.Виткевича и А.С.Хайкина) активно развивалась радиоастрономия, для целей которой был тотчас использован



На I Международной конференции по квантовой электронике. Слева направо: Г.Цайгер, Н.Г.Басов, Дж.Гордон, А.М.Прохоров, Ч.Таунс. США. 1959 г.



Нобелевские лауреаты 1964 г. Слева направо: Ч.Таунс, А.М.Прохоров, Н.Г.Басов, Д.Кроуфут-Ходжкин, К.Э.Блох, Ф.Линен.

новый инструмент — мазер, и открытия не заставили себя долго ждать: 16 апреля 1964 г., когда установленный на телескопе мазер на длину волны 21 см уже был состыкован с остальной аппаратурой и отлажен, через Пуццино проходила полоса покрытия Луной Крабовидной туманности — одного из наиболее интересных источников космического радиоизлучения, остатка сверхновой звезды, образовавшегося в результате ее взрыва. Благодаря высокой чувствительности радиотелескопа, оснащенного мазером, были получены важные научные результаты в исследованиях космического пространства (Р.Л.Сороченко, главный научный сотрудник Пуццинской радионаблюдательной обсерватории ФИАН). В последующие годы с участием Прохорова были получены высококачественные изображения поверхности Венеры и осуществлено управление при посадке лунхода на поверхность Луны.

**1965.** Начал разрабатывать (совместно с Х.С.Багдасаровым, В.В.Осико, Е.М.Диановым, И.А.Щербатовым, А.А.Маненковым, Т.М.Муриной и др.) физические и технологические основы создания высокоэффективных материалов (кристаллов, стекол, полимеров) для твердотельных лазеров. Эти исследования продолжал до конца своих дней.

**1966.** Отмечает 50-летие. Избран действительным членом АН СССР. Совместно с В.К.Конюховым предложил и реализовал новый метод создания инверсии населенностей уровней молекул в газовых смесях — адиабатическое расширение последних. На основе этого принципа были созданы мощные газодинамические лазеры ИК-диапазона.

**1967.** В феврале вместе с А.А.Расплетиным и Б.В.Бункиным назначен научным руководителем проекта «Омега», целью которого было создание лазерной системы противовоздушной обороны.

Награжден орденом Ленина за достигнутые успехи в развитии советской науки и внедрении научных достижений в народное хозяйство.

Открыл (совместно с В.Н.Луговым) новое явление в нелинейной оптике — многофокусную структуру волновых пучков в нелинейной среде; вместе с Ф.В.Бункиным и В.Б.Федоровым провел обширный цикл исследований по взаимодействию интенсивного оптического излучения с конденсированными мишенями, приводящему к фазовым превращениям вещества.

Во второй половине 60-х годов во многих лабораториях мира создавались мощные лазеры на неодимовом стекле. Одной из серьезных проблем таких лазеров было образование тепловой линзы, возникающей из-за неоднородного по радиусу поглощения света накачки лазерным стержнем. Тепловая линза увеличивала расходимость лазерного излучения. Чтобы преодолеть данное препятствие, А.М.Прохоров совместно с Е.М.Диановым и И.М.Бужинским (Лыткаринский завод оптического стекла) синтезировали и исследовали новое неодимовое стекло, свободное от этого недостатка. *Создатель новых стеклянных неодимовых лазеров д-р Снитцер (США) публично признал на одной из конференций, что Советский Союз опередил США в решении этой проблемы (Е.М.Дианов).*

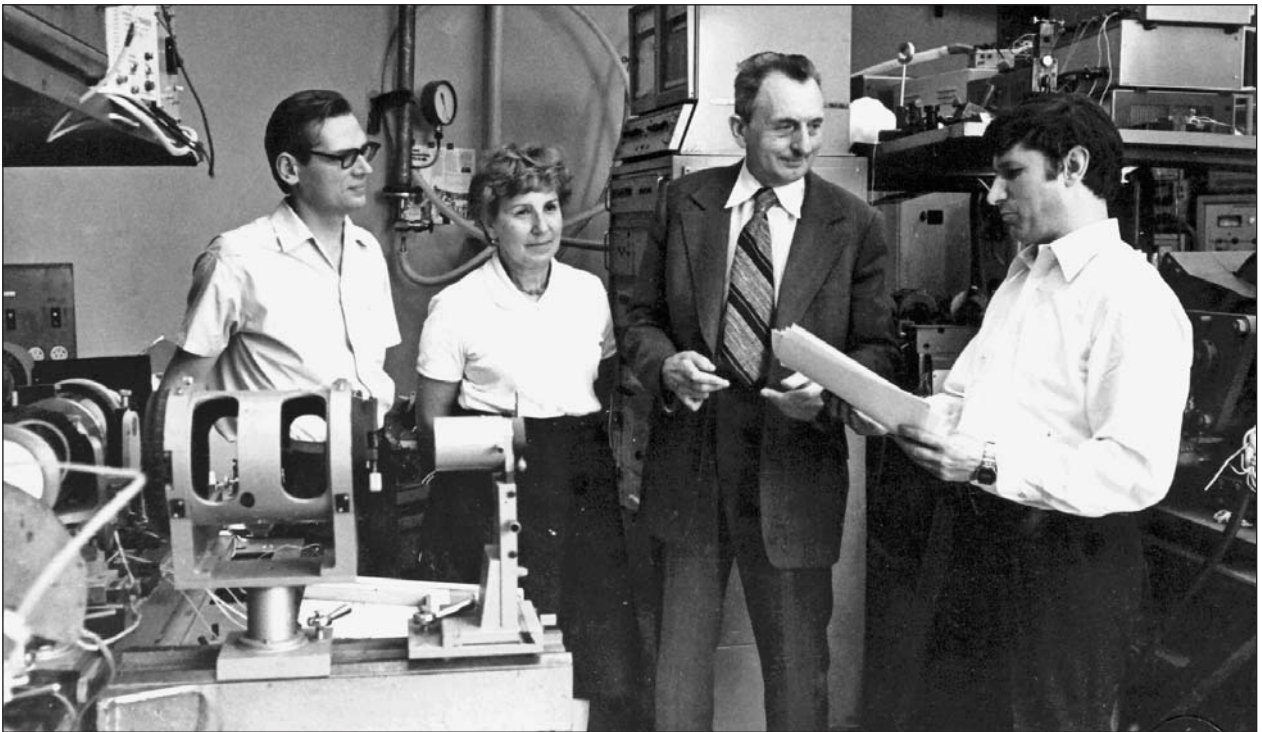
**1968.** С октября заместитель директора ФИАН, руководитель Отделения А института. Лазерная физика и квантовая электроника стали ведущими научными направлениями во всем мире. Шло напряженное соревнование с американцами. Собственно, уже вскоре после появления первого лазера были предсказаны или открыты практически все новые эффекты, которые могут происходить при взаимодействии когерентного излучения

с веществом. Это оптический пробой в газах, многофотонные процессы, нелинейные явления, включая параметрику и генерацию гармоник, самофокусировка, светогидравлический эффект, на основе которых рождались практические перспективы: создание оптических стандартов частоты, лазерное разделение изотопов, фотохимия, полупроводниковая накачка твердотельных лазеров и многое другое. Лазерная спектроскопия совершила революцию в оптической спектроскопии, повысив точность на 10 порядков. Большой вклад в открытие и изучение этих эффектов внес Александр Михайлович Прохоров с сотрудниками.

**1969.** 18 марта зарегистрировано открытие №65 «Светогид-



Пятидесятилетие, с женой. 1966 г.



Лауреаты Государственной премии СССР 1980 г. Слева направо: Е.А.Виноградов, Н.А.Ирисова, А.М.Прохоров и Г.В.Козлов.

дравлический эффект» (совместно с Г.А.Аскарьяном и Г.П.Шипуло).

Присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот» за большие заслуги в развитии советской науки.

**1969–1991.** Председатель Научно-редакционного совета издательства «Советская энциклопедия».

**1971–1990.** Главный редактор 3-го издания Большой советской энциклопедии.

**1971–2002.** Член Президиума РАН.

**1972.** Поездка в США в составе делегации АН СССР во главе с президентом Академии М.В.Келдышем для подготовки совместного полета космических кораблей. Этот проект был осуществлен в 1975 г., когда на орбите произошла стыковка советского корабля «Союз» и американского «Аполлона».

**1973–1991.** Академик-секретарь Отделения общей физики и астрономии АН СССР.

Новым прорывом в лазерной физике стало развитие волоконно-оптической связи. В СССР эти работы начались в 1974 г. по инициативе Прохорова. К решению этой большой проблемы — созданию волоконных световодов с минимальным затуханием — были привлечены и химики: коллектив академика Г.Г.Десятых (Институт химии АН СССР). Ответственным исполнителем по всей тематике был Е.М.Дианов. Эта деятельность выросла в большое отдельное направление исследований, а сектор Дианова с годами превратился в отдельный институт — Научный центр волоконной оптики.

**1974.** Зарегистрировано открытие №147 «Явление многофокусности волнового пучка в нелинейной среде» (с приоритетом от 19 июня 1967 г.).

**1976.** Становится почетным членом Венгерской академии наук.

Один из новых важных участков работы коллектива под руководством Прохорова — создание научных основ метрики (комплекса методик и инструментов) для субмиллиметровой спектроскопии. С 1970 г. совместно с Н.А.Ирисовой и Е.А.Виноградовым был разработан ряд измерительных приборов на основе одномерных металлических решеток для данного диапазона длин волн. Результатом стало создание спектрометра, значительно превосходящего по всем главным параметрам лучшие зарубежные образцы для этого диапазона. Родилось отечественное научное направление — субмиллиметровая спектроскопия на основе ламп обратной волны (ЛОВ), и в итоге были созданы и внедрены несколько поколений уникальных ЛОВ-спектрометров типа МАСС, которые оказались востребованными не только в нашей стране, но и за рубежом. Разработанные спектрометры дают возможность получать научные результаты мирового класса.

**1977.** Избран иностранным членом Академии наук ГДР.

**1979–1992.** Заведующий кафедрой оптики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

**1980.** Присуждена Государственная премия СССР за создание субмиллиметровой спектроскопии на основе ламп обратной волны.

**1981.** Награжден орденом Ленина за активное участие в подготовке 3-го издания Большой советской энциклопедии.

**1982.** Избран иностранным членом Чехословацкой академии наук

**1982–1998.** Организатор и директор Института общей физики АН СССР/РАН (ИОФАН/ИОФ РАН). Решение Совета министров СССР и Президиума АН СССР об образовании нового института на базе Отделения А ФИАН — Института общей физики (ИОФ) АН СССР — принято в конце 1982 г. Директором избран академик А.М.Прохоров. Александр Михайлович оставался на этом посту до 1998 г. С 1998 г. ИОФ РАН возглавляет академик Иван Александрович Щербаков.

Новый институт разнообразием тематики оправдывал свое название — кроме традиционных научных направлений (лазерной физики и взаимодействия излучения с веществом) появились и новые: интегральная оптика, оптическая связь на волоконных световодах, спектроскопия сверхвысокого разрешения, микроэлектроника, акустика и гидроакустика, применение лазеров в медицине и экологии, физика магнитных явлений, физика тонких пленок и физика поверхности, разработка приборов для наблюдения сверхбыстрых процессов, адаптивная оптика и др. Численность сотрудников института приблизилась к 2 тыс. человек.

**1985.** Награжден орденом Отечественной войны I степени.

**1986.** Присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и второй золотой медали «Серп и Молот» за выдающиеся заслуги в развитии физической науки, подготовке научных кадров и в связи с 70-летием со дня рождения.

**1986.** Принимает в ИОФАН первого секретаря Московского городского комитета КПСС Б.Н.Ельцина. Этот визит имел большое значение для ускорения работ по волоконной оптике и микроэлектронике, лазерным кристаллам и стеклам. Обсуждались вопросы строительства нового лабораторного корпуса, а также выделения жилой площади и садовых участков для сотрудников института.

Среди множества научных областей, развитие которых тесно связано с именем Прохорова, достойное место занимает высокоскоростная фотография с использованием времяанализирующих электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Именно Прохоров с середины 60-х годов прошлого столетия до первых лет нового века возглавлял в нашей стране работы по изучению фундаментальных процессов, лежащих в основе высокоскоростной электронно-оптической фотографии. Им было организовано международное сотрудничество по созданию и применению методов и средств сверхскоростной электронно-оптической диагностики в лазерной физике. Он обеспечил условия для разработки конкурентоспособ-

ных электронно-оптических преобразователей, камер, дифрактометров и для их успешного применения в квантовой электронике, нелинейной и волоконной оптике, физике лазерной плазмы и управляемом термоядерном синтезе. Под его влиянием сформировалось и успешно развивается новое научное направление — фемто-аттосекундная фотоэлектроника.

**1988.** Присужден: золотая медаль имени М.В.Ломоносова 1987 г. за выдающиеся достижения в области физики, Премия Совета министров СССР за разработку и внедрение в народное хозяйство эксимерных лазерных спектрометров вакуумно-ультрафиолетового, ультрафиолетового и видимого диапазонов.

**1989.** Получил Премию Совета министров РФ за работу в области квантовой электроники.

**1991–2002.** Организатор и главный редактор международного научного журнала «Laser Physics».

Президент Академии инженерных наук РФ.

Огромная заслуга академика — создание Центра физического приборостроения (ЦФП) в Троицке. Прохоров уделял большое внимание приборостроительной отрасли, хорошо понимая, что это и путь к коммерциализации научных результатов, и фундаментальная база для последующих исследований. ЦФП — единственная в России организация, разрабатывающая эксимерные лазеры, в том числе медицинского назначения. Созданные в ЦФП лазерные системы для рефракционной хирургии — эксимерные лазеры серии «Микро-скан Визум» и фемтосекундные лазеры серии «Фемто Визум» — существенно потеснили аналогичную продукцию западных компаний: в какой-то период у ЦФП было более 40% российского рынка. Сейчас это успешно работающее подразделение ИОФ РАН, которое без поддержки Александра Михайловича не смогло бы состояться.

**1996.** Награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени за заслуги перед государством, большой личный вклад в развитие науки и подготовку высококвалифицированных кадров.

В Москве проходит международная конференция по лазерной физике. Среди иностранных гостей Ч.Таунс.

Почетный доктор Университета Нового Южного Уэльса.

**1996–2002.** Организатор и директор, почетный директор Центра естественно-научных исследований ИОФ РАН. Концепция центра заключалась в объединении фундаментальных и прикладных исследований в одной организации с целью упростить процесс создания новых приборов и устройств на новых принципах.

С середины 90-х годов Александр Михайлович предпринимал усилия по восстановлению в России полного цикла промышленного производства кремния — от кварца до пластины монокремния электронного качества. До распада СССР лишь четыре страны владели промышленной технологией

производства этого важнейшего стратегического материала: США, Германия, Япония и наша страна (после 1991 г. к оставшимся трем смог присоединиться только Китай). Под руководством Александра Михайловича разрабатывались технологии замкнутого цикла производства поликремния как из трихлорсилана, так и из моносилана. Именно этот блок служит ключевой позицией при создании полного цикла производства кремния. Работы шли совместно с Подольским химико-металлургическим заводом и с построенным в конце 80-х годов аналогичным предприятием в Таш-Кумыре (Киргизия). Основной упор делался именно на данный завод в связи с целым рядом преимуществ: наличием захлаженной воды в р. Нарын, недозагруженной Таш-Кумырской ГЭС и т.д. Эту работу Прохоров вел до конца жизни, однако во многом она держалась на его огромном авторитете и после его ухода остановилась.

**1998.** Присуждена Государственная премия РФ за разработку волоконных световодов среднего ИК-диапазона.

**1999.** Решением Международного астрономического союза одной из малых планет Солнечной системы присвоено имя Александра Михайловича Прохорова в ознаменование выдающихся заслуг ученого перед мировой наукой. Малая планета, (7269) Alprokhorov = 1975 VK<sub>2</sub>, была открыта 2 ноября 1975 г.

**2000.** Удостоен высшей награды Американского оптического общества — медали Фредерика Айвеса — за выдающиеся работы в области оптики. Избран иностранным членом Национальной академии наук Украины.

**2001.** Присуждена Демидовская премия за выдающийся вклад в развитие физики, создание науки о лазерах, развитие лазерных технологий и волоконной оптики.

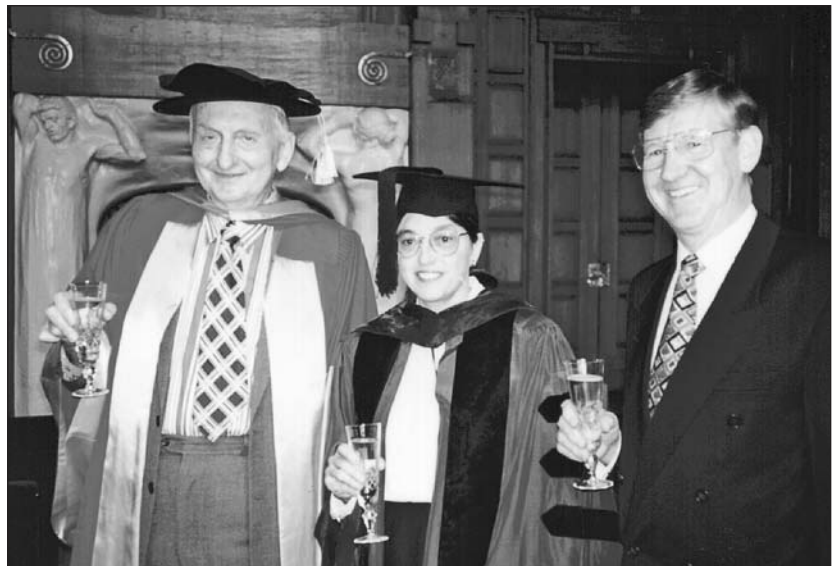
**2002.** 8 января Александр Михайлович скончался в Москве, похоронен на Новодевичьем кладбище.

Институту общей физики РАН присвоено имя академика А.М.Прохорова.

**2003.** На здании ИОФ РАН открыта мемориальная доска работы скульптора В.М.Клыкова.



Конференция по лазерной физике в Москве. 1996 г. Слева направо: Ч.Таунс, Е.А.Виноградов, Е.М.Дианов, А.М.Прохоров.



На присвоении звания почетного доктора Университета Нового Южного Уэльса в посольстве Австралии в Москве. Слева направо: академик А.М.Прохоров, профессор Джейн Моррисон, посол Австралии в России. 1996 г.

**2004.** Присуждена премия Правительства РФ 2003 г. в области науки и техники (посмертно) за разработку научных и технологических основ метрологического обеспечения измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию.

**2015.** Открыт памятник Прохорову в Москве (скульптор Е.Казанцева, архитектор А.Тихонов).

**Материал подготовили**

© **Т.Б.Воляк,**

кандидат физико-математических наук

© **Г.Н.Михайлова,**

доктор физико-математических наук

Институт общей физики РАН

# Первая глава

## Из воспоминаний Г.А.Прохоровой

Отец Александра Михайловича был человеком незаурядным, с сильным характером революционера-бунтаря. Михаил Иванович Прохоров родился в 1882 г. на Украине в семье заводского рабочего. Окончил церковно-приходскую школу и начал работать на производстве модельщиком — создавал модели для отливки деталей. В 1902 г. вступил в организацию Российской социал-демократической рабочей партии в Мариуполе. Позже переехал в город Балашов Саратовской губернии. Вел активную подпольную работу: распространял секретную литературу, хранил типографию, занимался организационными делами. В 1904–1905 гг. действовал под партийной кличкой Михаил 1-й в Оренбурге. Там познакомился с мамой Александра Михайловича — Марией Ивановной, тоже из семьи рабочего. Получившая только начальное образование, но от природы умная, энергичная, она производила впечатление интересного человека с широким кругозором. Они поженились в 1905 г. В 1906-м Михаил Иванович был арестован, но освобожден до суда, затем перебрался в Ташкент и в течение двух лет состоял членом комитета Туркестанской организации РСДРП и Красного Креста. Здесь у него была кличка Туча, что абсолютно не соответствовало его жизнерадостной, доброй натуре. За новым арестом 25 октября 1910 г. последовали осуждение окружным судом по статье 102-й за принадлежность к РСДРП(б) и в 1911 г. — ссылка на вечное поселение в Сибирь, в Енисейскую губернию.

Мария Ивановна с помощью товарищей-подпольщиков достает для мужа паспорт на чужое имя и отправляется к нему. В 1912-м Михаил Иванович с женой и двумя дочерьми бегут из ссылки на Дальний Восток, а оттуда — в Австралию. На северо-востоке страны, в штате Квинсленд, обосновалась русская колония, к ней и примкнула молодая чета Прохоровых. Там у них родилась третья дочь, Евгения, а 11 июля (по новому стилю) 1916 г. — первый и единственный сын Александр. Шура, так коротко его звали в семье. Саша, так будут называть его в дальнейшем.

Воспоминания Александра о его первых годах жизни коротки и отрывочны: очень тепло, кругом густые леса со множеством ярких птиц и бабочек. Товарищей не было. Четверо детей Прохоровых развлекали друг друга. Любимой их игрой было влезть на тонкое дерево и ждать, когда другие его подрубят. Деревце падало вместе с сидящим на нем. Очень хорошо запомнился поход за лесными

орехами. Самое яркое воспоминание тех лет носит, однако, трагический характер. Шуре было около пяти лет, когда однажды родители вместе с дочерьми ушли, оставив мальчика дома одного, и долго не возвращались. Заскучав, малыш решил их встретить, пошел по лесной дороге и заблудился. Стемнело. Мальчик метался в чаще. Растения жгли и царапали. Он путался в лианах. В конце концов устал, сел и всю ночь просидел не шевелясь, прислушиваясь к ночным шорохам леса. А тем временем все жители колонии судорожно искали ребенка в лесу. Нашла его утром сестра Клава. Шура был исцарапан, изранен, обожжен. Родители плакали, смеялись, целовали его. И мальчик почувствовал себя героем.

Когда Шуре исполнилось шесть лет, его отдали в подготовительную английскую школу (русской там не было). Сами занятия из памяти стерлись, но помнилось, как за непослушание и плохо при-



Свадьба Михаила Ивановича и Марии Ивановны. 1905 г.



готовленный урок учеников били по ладоням линейкой. Правда, ему не попадало.

В эмиграции в семье Прохоровых случилось большое несчастье. Их старшая дочь Клава, которая уже училась в пансионе, была способной ученицей, любимицей педагогов и подруг, заболела воспалением легких и через несколько дней умерла. Это горе на всех оставило неизгладимый след.

А в России уже произошла Октябрьская революция. Всех русских колонистов это сильно взволновало. Михаил Иванович с семьей засобирались на родину. Возвращение было нелегким и длительным. Сначала, в 1923 г., переплыв океан, семья обосновалась в Шанхае. Там надо было получить визу в Советскую Россию — ее Михаил Иванович добивался два месяца. Воспоминания Шуры о Шанхае коротки: поездки на рикшах, корабли, переполненные людьми с усталыми лицами, грустными глазами. Это русские, белые эмигранты, бежавшие из революционной России и не принятые другими странами. Наконец Прохоровы тронулись во Владивосток и дальше на запад.

Была зима. Утром Шура, прильнув к мутному окну вагона, увидел белые пушистые пятна на земле. Догадался — это снег: о нем мальчик не раз слышал от родителей и так хотел его пощупать! И вот после долгой и утомительной дороги они на родной земле, в Оренбурге. Ветры, метели, сугробы снега. Шура, хоть его и держали за руку, не мог идти — скользил, падал. Зато переворошил сугробы, поиграл в снежки.

Началась совсем новая жизнь. И взрослые, и дети приспосабливаются к ней постепенно. Но Михаила Ивановича тянет в Ташкент. Туда, где тепло, а главное, где он трудился в железнодорожных мастерских, пылко отдаваясь подпольной борьбе. В Ташкенте Михаил Иванович поступает на работу в Музей революции. Его задача — подобрать материалы, экспонаты по революционной истории города. Мария Ивановна воспитывает детей. Все трое пошли в русскую школу имени Коминтерна на улице Гоголя. Но семью постигло еще одно несчастье: умерла от столбняка дочь Валя.

Шура учился легко, ровно. С пятого класса начались математика и физика — по ним он успевал лучше всего. Но особой увлеченности пока ни в чем не было. Больше его привлекали игры на улице с другими детьми в лапту, купание в реке Салар. Случались и драки между «коренными» ребятами с разных улиц. Но Шура никогда не был зачинщиком драк. Наоборот, иногда ему приходилось обходить опасную улицу.



Саша после окончания рабфака. 1934 г.

Оканчивал школу Шура уже в Ленинграде, куда в 1930 г. переехала семья Прохоровых. Благодаря успешному окончанию семилетки, а также революционными заслугам отца, его без экзаменов зачислили на рабочий факультет (рабфак) при Ленинградском электротехническом институте имени Ульянова (Ленина). Тогда же Шура стал радиолюбителем (это увлечение он оставил, лишь когда научная работа вытеснила все остальное). А в летние каникулы его любимым делом было решать задачи по математике и физике. Занимался Шура и на Высших курсах английского языка, поддерживая австралийскую практику. Знание языка очень помогло в будущем.

По мнению моего мужа, учеба в Ленинграде вместе с рождением в Австралии предопределила всю его дальнейшую судьбу. В те годы Северная столица, несомненно, была научным центром страны. Здесь А.Ф.Иоффе создал свою знаменитую школу экспериментальной физики с особой атмосферой.

Выпускник 1934 г., Шура не сомневался в выборе дальнейшего пути: он подал документы на физический факультет Ленинградского университета и в том же году без экзаменов (как успешно окончивший рабфак) поступил туда. Вымахал до 1 м 90 см — перерос родного отца. Всегда выглядел худым и бледным.

Начинается новая интересная жизнь студента-первокурсника Саши (так стали звать его в университете). Захватывающая учеба, знакомство с новыми товарищами, увлечение альпинизмом, радость от ощущения молодости, здоровья, сил. Отношения в семье были прекрасными. Жили они у Кировского моста, в известном доме политкаторжан, с видом на Неву и Петропавловскую крепость. В свободное время Саша увлекался велосипедом: добирался на нем на занятия, путешествовал с товарищами по пригородам Ленинграда. Зимой на смену велосипеда приходили лыжи. На два курса старше, тоже на физфаке университета, училась его сестра Женя.

На физическом факультете в те годы подобрался сильный преподавательский состав. Член-корреспондент Сергей Эдуардович Фриш прекрасно читал курс общей физики. Электродинамику читал профессор Матвей Петрович Бронштейн. На старших курсах преподавали академик Владимир Александрович Фок, член-корреспондент Евгений Федорович Гросс. Семинары вел Борис Сергеевич Желепов, у которого Саша Прохоров проходил практику в качестве лаборанта.

Но не всегда дни университетской жизни текли гладко, были и потрясения. В злобещий 1937 год не

один портрет профессора пропал со стен университетского коридора. Студенты знали: не пришел профессор на лекцию и портрет его снимают, значит, арестован. Это произошло с Бурсианом, Лукирским, Крутковым, Фоком и другими. Да, и Фок исчезал, и портрет его был снят. Но месяца через два Владимир Александрович появился снова. Посмотрел на стену — нет его портрета. Пошел выяснять, почему. В деканате все были в шоке: это было «не по правилам». Почему его отпустили? После этого сняли уже все портреты — на всякий случай.

В 1939 г. Прохоров получил диплом с отличием. Ему предложили место ассистента на родном факультете. Но Александру было суждено пойти по другому пути.

Физический институт имени П.Н.Лебедева АН СССР в Москве, возглавляемый академиком Сергеем Ивановичем Вавиловым, прислал запрос на физфак Ленинградского университета о лучших выпускниках. Саша в то время был на Кавказе с альпинистской группой. Когда он вернулся, его ждало письмо из ФИАН с приглашением на экзамен в аспирантуру. Саша был крайне удивлен и, конечно, обрадован. Экзамены по философии и английскому он сдал сразу в Ленинградском отделении Академии наук, а физику поехал сдавать в Москву. В комиссию входили выдающиеся ученые — Игорь Евгеньевич Тамм, Григорий Самуилович Ландсберг, Николай Дмитриевич Папалекси, Николай Николаевич Андреев. Собеседование продолжалось довольно долго. В спокойной обстановке экзаменаторы тщательно прощупывали будущих ученых (поступавших было несколько). По условию конкурса Прохорова в аспирантуру взяли.

И вот в сентябре 1939 г. Александр впервые переступил порог ФИАН.

Поначалу Андреев предложил новому аспиранту заниматься акустикой. Но Александр остался верен радиофизике. В ФИАН была возглавляемая академиком Папалекси лаборатория колебаний — именно к этому влекло Сашу. Он был принят в эту лабораторию, и его работа как экспериментатора началась. Кроме Николая Дмитриевича научное руководство осуществлял академик Леонид Исаакович Мандельштам, обогативший тематику лаборатории. Занятия еще больше увлекли и уверили молодого аспиранта в правильном выборе специальности. Непосредственным его руководителем был кандидат наук, впоследствии академик Владимир Васильевич Мигулин.

Аспиранты-первокурсники жили под Москвой, на станции Удельная Казанской железной дороги. Академия наук оплачивала для них частное помещение (это считалось общежитием). Условия жизни были не из легких. Суровая зима, до Москвы не близко, да и «все удобства во дворе». На следующий год дали место в настоящем общежитии для аспирантов в Москве, на Малой Бронной. На троих аспирантов было выделено две комнаты. Кроме Александра Михайловича — Саши, в них поселились

Леонид Максимович Бреховских — Леня, окончивший Пермский университет, позднее академик, и Павел Эммануилович Немировский — Пава — из Одесского университета, впоследствии — доктор физико-математических наук. На Малой Бронной жизнь была интересней и веселей.

Аспиранты очень сдружились. Помимо занятий в институте, в библиотеке и дома у них хватало времени на дискуссии, споры. Александр в спорах моментально загорался, повышал голос, речь его убыстрялась, он не мог усидеть на одном месте. Одним словом, становился «Прохорадзе», как его позже из-за импульсивности шутя называли в армии. Немногим уступал ему и Павел. Более уравновешенным был Леонид. Он же предложил для их компании особый режим — «железный принцип жизни (ЖПЖ)». Была разработана программа: перед сном обязательно гулять. Ходить на каток и на лыжах, не есть сластей и фруктов, заменить их на лук. Правда, против ЖПЖ восстал Немировский: на воздух и каток его выводили «силой».

Предвоенной зимой Саша с Леной по воскресеньям (суббота была рабочим днем) ездили за город кататься на лыжах. Иногда к друзьям присоединялся их ровесник Виталий Лазаревич Гинзбург, позже академик. В одно из ноябрьских воскресений он пригласил на лыжную прогулку свою знакомую, а та — меня, свою подругу. Встреча состоялась на Ленинградском вокзале. Мне очень хорошо запомнилось первое впечатление при знакомстве с Александром: высокий, худой, с бледным аскетичным лицом, строгим, холодным и каким-то отчужденным. Но большие глаза, тогда голубовато-серые, были добрыми. Из-под серой кепки виднелись светлые волосы. Наша компания доехала до станции Сходня, на лыжной базе мы взяли лыжи и проходили по лесу до сумерек.

Эти воскресные походы уже не прекращались, весной они превратились в прогулки. Правда, вскоре участников поездок в Сходню осталось трое: Саша Прохоров, Леня Бреховских и я. Время проходило быстро и приятно. Наша дружба росла. Иногда по вечерам два друга приходили ко мне домой. «На пироги», как любил шутить Леня. По характеру они были совсем разными, но Саша больше не казался холодным и строгим. И уже тогда я заметила, что в нем не было и тени тщеславия. Как у большинства людей довоенного времени, у Саши не было никаких претензий к одежде. Синий пиджак в обтяжку и очень нескладные, широкие черные брюки, сшитые его мамой, — все, что у него было. Хотя он выглядел далеко не элегантно, в нем чувствовалась интеллигентность и воспитанность. Все больше и больше узнавая его, я убеждалась, что это очень интересный и порядочный человек, вызывающий большую симпатию. Начались выходы в театры, хотя и редкие. Бывали случаи, когда Саша по рассеянности приводил меня в театр на несколько дней раньше или позже спектакля, а иногда он запаздывал к началу.

Во всех случаях он расстраивался; я всегда его прощала, ибо видела, что это вызвано его увлеченностью работой.

И весной 1941 г. состоялось объяснение в любви, было сделано и принято предложение. Мы планировали так: Саша едет в Алма-Ату в экспедицию по изучению предстоящего солнечного затмения, а я — в географическую экспедицию в Тульскую область (в 1939 г. я окончила географический факультет). В сентябре мы хотели зарегистрироваться и поехать в Ленинград к родителям Саши. Пока же я уехала в экспедицию первой, Саша провожал меня. Наши планы перечеркнула война...

Александр с другими аспирантами института отправился записываться в ополчение. Но так как он в университете прошел подготовку в войсках зенитной артиллерии и получил звание младшего лейтенанта, в ополчение его не приняли, сказав, что он должен ждать вызова в военкомат. Вскоре его призвали. Полетели русые волнистые волосы, и бывший аспирант облачился в нескладную военную форму с петлицами артиллерийских войск, с пилоткой на голове. Артиллеристом, однако, он не стал — военкомат направил его на сформированные под Москвой курсы разведчиков.

В последних числах июля я вырвалась из экспедиции. При первой же встрече мы решили, что перед его отправкой на фронт нам надо зарегистрироваться, чтобы не потерять друг друга. Регистрация была назначена на ближайшее воскресенье. И на 43-й день войны, солнечным днем 3 августа, младший лейтенант Прохоров попросил у начальника военной части увольнительную в Москву до девяти часов вечера. Причину увольнения он не сообщил. А причиной было посещение ЗАГСа Фрунзенского района города Москвы для регистрации брака. Через 10–15 минут мы вышли оттуда супругами Прохоровыми. Как отметить такое важное событие в радостный для нас день? На метро доехали до площади Свердлова. На том месте, где сейчас в разросшемся сквере стоит памятник Карлу Марксу, на асфальте распластался немецкий самолет, впервые подбитый над Москвой. Самолет охранялся милицией, а площадь была окружена очередью желающих осмотреть его. Александр Михайлович, как военный, не без гордости прошел без очереди к юнкерсу, пропустив вперед жену.

А потом нам захотелось пригласить к себе друзей. Дома ждала бутылка шампанского и печенье. Но, увы, все знакомые были либо на фронте, либо в эвакуации. В конце концов младший лейтенант Прохоров опоздал в военную часть, за что получил наряд. Позже его командир очень сокрушался по поводу наряда, узнав, что Прохорова задержали такие важные «семейные обстоятельства».

Приближалась осень, немецкие части наступали. Военные курсы разведчиков перевели в Москву, в Фили. Увольнительные уже не давались. Лишь изредка нам удавалось ненадолго встретиться — я подъезжала к условленному месту.

16 октября 1941 г. с утра поползли слухи, что немцы уже у заставы Москвы. Саша стремительно вошел в квартиру, где я жила с мамой. Шинель наглухо застегнута, за спиной большой рюкзак с подвешенной каской. Он был взволнован: курсанты покидали Москву. Но куда — на фронт? В тыл? Он не знал. Был дан приказ к четырем часам дня всем явиться к гостинице «Балчуг». Я бросилась одеваться, чтобы проводить мужа до гостиницы. От Кропоткинских ворот до «Балчуга» быстро дошли по набережной пешком.

Все этажи гостиницы и площадь перед ней были заполнены военными. Были и провожающие. Мы узнали, что с военными могут уходить и жены. Значит, пока не на фронт. Саша хватается за руку: «Пойдем!», но ведь я лишь ненадолго выскочила из дома, где осталась моя мать! Быстро решаем: я бегу домой, прощаюсь с мамой и возвращаюсь к «Балчугу». Саша поднимается со мной по лестнице Московского моста, чтобы немного проводить, и в это мгновение у угла Кремлевской стены происходит взрыв, потом еще один — это немецкий самолет прорвался к центру Москвы. Мы стремительно сбегает с лестницы и прячемся под мост. Тут же раздается быстрая военная команда строиться. Мгновенно строй готов, и колонны поспешно трогаются. Саша бегом, придерживая прыгающую каску за спиной, догоняет строй и сливается с колонной. Я быстро иду домой и громко плачу. На следующий день я чуть свет снова была у «Балчуга». Военные курсы продолжали эвакуацию, переполненные машины уходили одна за другой, и наконец один грузовик меня подобрал. Я догнала мужа в деревне, где курсанты были расквартированы по домам после суточного перехода.

Александр доложил командованию курсов, что к нему присоединилась жена. Меня поставили на военное довольствие, и нам разрешили самостоятельно добираться до Владимира. Началось наше «свадебное путешествие». Попутных машин было много. Уже на следующий день все курсанты собрались на территории старого Владимирского кремля. Семейных поселили в отдельном помещении. Нас было пять пар; молодые женщины сразу же объединились, побежали на местный базар, стали готовить.

Из Владимира курсантов с женами поездом перевезли в Казань. Ехали в теплушке, так плотно наполненной людьми, что можно было только сидеть. Питание — хлеб с кипятком, наскоро налитым в казенные чайники при остановках поезда.

В Казани курсантов, как и во Владимире, поместили в Кремле. Обучение на курсах считалось законченным. Ждали распределения и отправки на фронт. Нам оставаться с ними не разрешили, но семейным можно было поселиться в городе. Мы с Сашей временно заняли крошечную темную комнатку, принадлежащую эвакуированному Павлу Немировскому. ФИАН, как и многие другие академические институты, был переведен в Ка-

заны. Но близких друзей Прохорову увидеть не удалось: они работали на трудовом фронте — сооружали оборонительные укрепления. Немировский в то время тоже работал там, а позже отправился в действующую армию.

Здесь мы с Сашей прожили около десяти дней, с часу на час ожидая перемен. 8 ноября мой муж, как и другие курсанты, получил направление на фронт. Приказ был короткий: «...Направляется в распоряжение штаба Западного фронта».

Александр успел только получить ордер и поселить меня в чужой, незнакомой семье, в одной комнате вместе с ними. В сумерках пасмурного ноябрьского дня мы стояли на перроне вокзала у вагона и никак не могли расстаться — несколько раз прощались и расходились, но стоило оглянуться — снова бросались друг к другу. Наконец Саша проводил меня до угла серого здания вокзала. Расцеловавшись в последний раз, мы быстро разошлись. Оглянувшись, ни он, ни я уже не видели друг друга, разделенные зданием. Я шла с вокзала в свой новый дом, как с кладбища после похорон самого близкого человека.

В начале зимы 1941 г. Прохоров был направлен под Тулу в штаб Армии. Здесь он около месяца обрабатывал сведения, получаемые от тех, кто вышел из окружения. Потом был переведен в 26-ю Курсантскую отдельную стрелковую бригаду на должность помощника начальника штаба по разведке. Бригада формировалась в Никольско-Урюпине, а в декабре 1941 г. была переброшена на Северо-Западный фронт. В этом районе с севера на юг проходило шоссе Старая Русса — Холм. К востоку от шоссе была окружена Демянская группировка немцев. Снабжались они с помощью транспортных, хорошо вооруженных самолетов, кото-

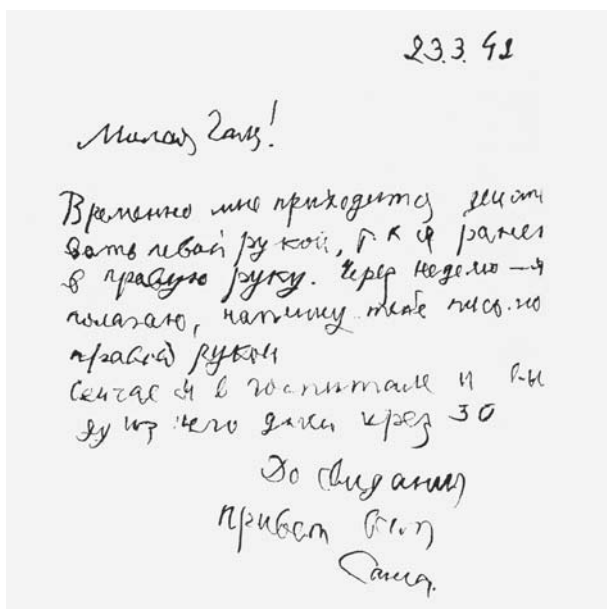
рые часто обстреливали наши военные части на шоссе. Во время марша бригады, в которой был мой муж, один немецкий самолет был сбит, летчики взяты в плен.

К западу от шоссе — болото — «ничейная полоса». На несколько месяцев военная судьба связала Александра с этим клочком земли. Разведчики его бригады следили, чтобы немцы не прорвались с тыла к частям Красной армии. Позже здесь образовали линию обороны. Но тогда бригада обеспечивала подвижную оборону вдоль шоссе Старая Русса — Холм. Иногда жили в оставшихся от деревень домах, но в основном в лесах, в шалашах. Саша ходил в разведку с группой от трех до десяти человек. Однажды им удалось захватить в плен «языка».

Когда бригада заняла оборону под Холмом, во время одной вражеской бомбежки переднего края 9 марта 1942 г. лейтенант Прохоров был ранен осколком авиабомбы в правое предплечье. Первую помощь ему оказали в землянке, и он отправился один в медсанбат, не раз укрываясь от вражеских самолетов. В медсанбате осколок вынули, и он с группой раненых пошел в эвакогоспиталь, где лечился в ожидании эвакуации. В конце марта его перевели в госпиталь под Москвой, в Абрамцево. Ранение оказалось довольно серьезным — была покалечена кисть правой руки и пербит локтевой нерв. Мизинец и безымянный палец перестали действовать и навсегда скрючились. Позднее квалифицированные нейрохирурги пытались спасти его руку, но в апреле 1942 г. лейтенанту Прохорову просто залечивали рану и готовили снова на фронт. Здесь он начал учиться работать левой рукой. И первое, что сделал, — нацарапал короткое письмецо мне в Казань, где я застряла в эвакуации и не могла выбраться в Москву. Это письмо с сообщением о ранении и мое отчаянное желание видеть мужа помогли мне получить пропуск в столицу.

В конце апреля я наконец вернулась туда и на следующий же день с утра отправилась в госпиталь. Для Александра мое появление было полной неожиданностью. Почти каждый день я приезжала к нему. По существу это был наш медовый месяц. Наконец мы опять вместе! Как и раньше, гуляем по весеннему лесу, собираем первые цветы, слушаем пение птиц, греемся на ласковом солнышке, удобно устроившись на куче валежника или на поваленном дереве...

К середине лета 1942 г. рана на руке зажила. Прохоров был направлен в распоряжение штаба Западного фронта, а оттуда временно в Западный штаб партизанского движения, так как по состоянию здоровья было рано посылать его в действующую армию. Осенью Александр был переведен в 94-й Гвардейский стрелковый полк 30-й стрелковой дивизии того же Западного фронта на должность помощника начальника штаба полка по разведке. На участке фронта, куда прибыл Са-



Письмо Александра Михайловича из госпиталя жене. 1942 г.

ша, нашего наступления в ближайшее время не предполагалось. Но надо было следить за немцами: не готовят ли наступление они. Противник все время предпринимал огневые налеты на наши позиции. Обстрел был постоянный. Александр не раз отправлялся в составе разведывательной группы в ночные рейды по тылам противника.

В одной из таких разведок боем в феврале 1943 г. группа попала под сильный минометный обстрел. Саша был ранен осколком мины в левое бедро. Позже врачи говорили: «Ему удивительно повезло». При обширном сквозном ранении чудом не были задеты ни нерв, ни кость, так что нога сохранилась. Попав в эвакогоспиталь (бывшую городскую больницу Волоколамска), муж, как и обещал, дал знать о себе. Я получила письмо — клочок, исписанный нетвердой рукой: «Болен. Лежу больнице в Волоколамске. Прележу, наверное, долго»... Сразу ясно — ранен, по-видимому, серьезно. Я должна ехать к нему. Но как попасть в Волоколамск, находящийся примерно в 50 км от фронта?

В военное время люди были очень отзывчивыми. Не успела я обратиться к администрации Института географии АН СССР, где работала, с просьбой помочь, как мне дают командировку на несколько дней в Волоколамск. По командировке получаю пропуск и железнодорожный билет. И вот, в последних числах февраля, к концу дня, я не иду, а бегу с рюкзаком за спиной по главной улице Волоколамска к больнице. В канцелярии мне говорят: «Да, есть такой раненый». Называют корпус, палату и разрешают сейчас же к нему пройти. Больница переполнена ранеными. В палате, где лежат шесть человек, в правом углу у окна я нахожу своего мужа. Он худ и бледен. Снова острижен. У кровати стоят костыли. Ранение в левое бедро сквозное, образовались две очень большие продольные раны с узенькой перемычкой уцелевшей ткани между ними. Потеряно много крови. Начальник госпиталя доктор Раппопорт встречает меня исключительно приветливо. Меня ставят на довольствие и помещают в общежитие медсестер. С утра до вечера я в палате, помогаю раненым, на местном базарчике покупаю им какие есть овощи. Меня удручают вялость и инертность мужа. Спрашиваю, нельзя ли мне лично перевезти раненого в московский госпиталь. Раппопорт соглашается и обещает с попутной машиной отправить Александра со мной в Москву. Но попутки все нет и нет, а срок моей командировки немолимо истекает. И вот однажды раненых начи-



А.М.Прохоров (слева) в госпитале. 1942 г.

нают вывозить, так как надо освободить места для нового пополнения (предстоят бои за освобождение Ржева). Куда везут раненых, никто не знает. Раппопорт куда-то отлучился. Тяжелораненых оставляют в больнице, так что могут оставить и Сашу. Уезжать или нет? Сам Александр ко всему безразличен, отвечает: «Не знаю, решай сама». Решаю — даже если будут отправлять в тыл, повезут через Москву, авось удастся его там оставить. Мужа быстро одевают и последним буквально всовывают в машину. Я следую за ним. Машина трогается. Уже в наступающих сумерках нас высаживают у каких-то незнакомых длинных низких барачков. Раненых помещают в большие палаты с нарами, Прохорова укладывают на верхнюю койку. Александр лежит ко всему безучастный с закрытыми глазами. Соображаю, что это перевалочный пункт. Но сколько времени продержат здесь раненых? Накинув на плечи пальто, выскакиваю из барака, разыскиваю штаб. Начальника нет, но скоро должен быть. Секретарь и врач явно заинтересовались, зачем мне понадобился начальник. Взволнованно рассказываю о создавшемся положении и чувствую с их стороны интерес и доброжелательность. Несколько раз я мечусь между барачком и штабом. Александр Михайлович вяло твердит: «Зачем ты бегаешь? Не надо». Я даже немного взрываюсь: «Скажи, ты хочешь в Москву? Лежать в московском госпитале?» Ответ какой-то неопределенный — и снова закрытые глаза.

Наконец, уже ночью, в первой комнате штаба мне торопливо сказали: «Товарищ Прохорова, майор приехал. Сейчас он вас примет». За столом сидел здоровый, коренастый, смуглый мужчина с усталыми, покрасневшими глазами. Я поняла, что обо мне уже докладывали. Майор предложил сесть и начал тихим тягучим голосом, но перешел на громкий и даже на крик. Вдобавок еще стукнул

кулаком по столу. Он не верил, что врач Раппопорт разрешил мне самостоятельно увезти раненого, и удивлялся, как я могла сюда попасть.

Я чувствовала, что все мои планы погибли и в этом виновата я — не дождалась Раппопорта и сунула мужа в машину. Надо было оставаться в Волоколамской больнице и ждать. И тут на меня нахлынули произвольные слезы, безудержные, потоком. Я плакала и тихо приговаривала: «Что же мне делать? Я не могу его оставить, и у меня кончается командировка». Наверное, это подействовало на майора — он смягчился. Начал звонить по телефону Раппопорту, к счастью, оказавшемуся на месте. Майор строго спрашивал, правда ли, что тот обещал лейтенанта Прохорова отпустить с женой в московский госпиталь, и не забыл ли только что вышедший приказ тов. Ворошилова, запрещающий самостоятельное передвижение раненых. У меня дико колотилось сердце. «Хорошо, — сказал майор Раппопорту, — я их отправлю, если ты в течение часа пришлешь мне сопроводительный документ за своей подписью». «Вот теперь идите и ждите», — сказал мне майор более спокойно. Часа не прошло, как в палату быстро и радостно вошел молодой врач с бумагами и со словами: «Товарищ Прохорова, вот вам все документы. Сейчас мы вашего мужа отвезем на станцию к московскому поезду». Как я им всем благодарна по сей день! Столько участия и доброты проявили они! Это были люди фронта.

Два врача в санитарной машине отвезли нас на станцию Волоколамск. Отыскали вагон для военных в подошедшем составе. Распорядились, чтобы проводница предоставила нам место поудобней. Мы ехали вдвоем в жестком купе. Александр, упав на жесткое сиденье, прямо в шинели и в шапке, проспал всю ночь. Я в тревоге бесцельно просидела у окна. На Рижский вокзал прибыли около восьми утра. Первые числа марта, подмораживало. С помощью проводницы медленно спустили раненого и усадили прямо на перроне на какую-то тележку.

На каждом вокзале был штаб Красного Креста. С рюкзаком на спине побежала туда. «Я привезла раненого. Как мне его доставить в госпиталь?» — «Сколько их?» — приветливо спросила у меня дежурная. «Всего один!» — но как мне дорог! Подошел дежурный врач. Мне сказали, что они могут вызвать санитарную машину, и раненого отвезут в госпиталь, но в какой — неизвестно, где будет место. В Сокольниках же есть хороший госпиталь для офицерского состава. Вот если я смогу довезти его туда сама, то он там будет непременно принят. Конечно, доведу! От вокзала троллейбусом, потом пересадка на трамвай и совсем немного пройти пешком.

Когда мы в Сокольниках не сошли, а сползли с трамвая, солнце было уже высоко и блестели лужи и ручьи. Измученный Саша висел у меня на левом плече, а спину мне оттягивал рюкзак с куплен-

ными в Волоколамске овощами. Бросить такую ценность было нельзя! Дорога пешком нам показалась очень длинной. Но вот наконец светлое, красивое здание госпиталя. Раненого приняли мгновенно и из приемной в палату уже несли на носилках. Так Александр оказался в московском госпитале. К середине лета он мог уже самостоятельно ходить, а к концу ему давали увольнительные в город. Он бывал у меня. Иногда мы ходили в театры и на концерты. В первых числах сентября его выписали.

В это время в Институте курортологии профессор Зацепин начал заниматься восстановлением поврежденных нервов. Он заинтересовался Сашиной раненой рукой и положил его в институт. Но операция не помогла. Опять медицинская комиссия и другой госпиталь в Москве. Здесь также разрабатывались методы лечения конечностей, и врачи нацелились опять оперировать Александра. Но случайно встретившаяся мне врач из сокольнического госпиталя сказала, что если нужна операция, то только в Институте нейрохирургии у профессора Аренда. Мне удалось добиться, обратившись к начальству, чтобы мужа туда перевели. Я встретилась с профессором Арендом, который обещал лично сделать операцию по восстановлению локтевого нерва правой руки.

В конце 1943 г. Аренд пересадила Саше живой телячий нерв в надежде, что тот приживется. Но этого не произошло. Зимой 1944 г. медицинская комиссия признала Прохорова негодным к строевой службе. Тогда же он получил инвалидность третьей группы. Через пару лет, когда после защиты кандидатской диссертации он стал получать повышенную зарплату, решил отказаться от получения пенсии, хотя раненая рука продолжала беспокоить. И по настоянию врачей уже в 1982 г. инвалидность была восстановлена.

В феврале 1944 г., демобилизовавшись, Александр Михайлович поселился у нас с мамой, в одном из переулков у Кропоткинской площади, где мы занимали комнату в 15,5 м<sup>2</sup> в семикомнатной коммунальной квартире (одна соседка жила даже в коридоре). Жильцы подобрались удивительно деликатные и чуткие, все старались друг другу помогать, Сашу приняли как родного.

И сразу же, в приподнятом настроении, Александр помчался в ФИАН. Там его встретили чуть ли не как пришельца с того света — с фронта еще никто не вернулся, пришло лишь несколько сообщений о гибели фиановцев. Лабораторией колебаний по-прежнему заведовал Папалекси. Мигулин там уже не работал. Руководителем Саши в аспирантуре стал доктор наук (позднее член-корреспондент) Сергей Михайлович Рытов. В лаборатории Александр почувствовал себя как рыба в воде — он снова был на своем месте. Ему двадцать восемь лет. У него целы руки (хотя одна и искалеченная), ноги и, главное, голова, жаждущая работы, работы и работы. Он снова следует своему призванию, которое приведет его к заслуженным успехам и наградам. ■

# *Жизнь идей*



Только на основе фундаментальных исследований возникают новые важные практические приложения, которые до этого нельзя было предвидеть. Научно-технический прогресс базируется на результатах фундаментальных исследований. Отсюда следует, что фундаментальные исследования нужно развивать широким фронтом.

А.М.Прохоров

# Светогидравлический эффект Прохорова—Аскарьяна—Шипуло

С.Н.Андреев, Д.Г.Кочиев, Г.А.Шафеев, И.А.Щербаков

«Экспериментально установлено неизвестное ранее явление возникновения гидравлического ударного импульса при поглощении внутри жидкости светового луча квантового генератора (светогидравлический эффект)», — так гласила формула открытия, зарегистрированного А.М.Прохоровым, Г.А.Аскарьяном и Г.П.Шипуло в Государственном реестре открытий СССР под номером 65 с датой приоритета от 28 февраля 1963 г. За этими скупыми словами скрыто начало новой технологической эпохи.

## Сбывшиеся прогнозы

В том историческом эксперименте вода, подкрашенная медным купоросом, облучалась мощным лучом импульсного рубинового лазера. При достижении определенной интенсивности излучения начиналось образование пузырьков, а затем жидкость закипала [1]. Если же луч фокусировался вблизи поверхности погруженного в воду тела, происходило взрывное вскипание и распространялись ударные волны, которые приводили к повреждению твердых поверхностей (вплоть до разрушения кюветы!) и выбросу жидкости (высота струи достигала 1 м!).

В описательной части авторы отмечают: «Повидимому, открытие даст возможность получать мощные гидравлические ударные импульсы и использовать их, например, для штамповки, обработки и упрочнения материалов, для ударной сварки и т.д. Светогидравлический эффект очень важен для микроэлектроники, для условий особо



Авторы открытия Г.А.Аскарьян, А.М.Прохоров и Г.П.Шипуло (слева направо) у экспериментальной установки по исследованию светогидравлического эффекта.

чистых поверхностей, для обработки таких материалов и изделий, которые исключают применение электродов, и т.д. Используя светогидравлический эффект, можно издалека, дистанционно, возбуждать гидравлические и ультразвуковые импульсы лучом света, падающим на поверхность воды». Как показало время, эти слова во многом были пророческими. Физика данного явления оказалась очень красивой и многогранной.

За годы, прошедшие с момента открытия, светогидравлический эффект был подробно исследован. Были изучены различные механизмы поглощения лазерного излучения в конденсированных средах, механизмы образования импульсов давления и ударных волн, фазовые переходы под действием лазерного излучения и многое другое. Выяснилось, что этот эффект наблюдается при лазерном воздействии не только на поглоща-





**Степан Николаевич Андреев**, доктор физико-математических наук, ученый секретарь Института общей физики имени А.М.Прохорова (ИОФ) РАН. Специалист в области физики релятивистской лазерной плазмы.



**Давид Георгиевич Кочиев**, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ИОФ РАН по научной работе. Научные интересы связаны с лазерной физикой и лазерами для хирургии.



**Георгий Айратович Шафеев**, профессор, доктор физико-математических наук, и.о. директора Научного центра волновых исследований ИОФ РАН. Область научных интересов — физика взаимодействия лазерного излучения с конденсированными средами.



**Иван Александрович Щербаков**, академик, академик-секретарь Отделения физических наук РАН, профессор, доктор физико-математических наук, директор ИОФ РАН, заведующий кафедрой лазерной физики Московского физико-технического института. Награжден золотой медалью имени А.М.Прохорова РАН (2013). Занимается лазерной физикой, спектроскопией, нелинейной и квантовой оптикой, медицинскими лазерами.

**Ключевые слова:** лазерная абляция, плазма, кавитация, лазерный литотриптор.  
**Key words:** laser ablation, plasma, cavitation, laser lithotripter.

ющие жидкости, но и на твердые тела — металлы, диэлектрики, полупроводники. Светогидравлический эффект лег в основу многих передовых технологий в науке, промышленности, здравоохранении. Диапазон энергий используемого лазерного излучения сегодня огромен — от микроджоулей до килоджоулей и выше, длины волн источ-

ников занимают интервал от ультрафиолетовой до средней инфракрасной области. Основная на этом эффекте лазерная абляция — удаление вещества с поверхности мишени лазерным лучом — имеет широчайшие применения. Возможность сфокусировать интенсивное излучение в пятно диаметром порядка одного микрометра позволяет производить поистине ювелирные манипуляции.

Например, при использовании фемтосекундных импульсов титан-сапфирового (Ti:Sa) лазера с длиной волны 800 нм и плотностью энергии в импульсе менее 3 Дж/см<sup>2</sup> удается добиться филигранной точности в обработке алмаза, удаляя его поверхностный слой толщиной в один атом за 1000 лазерных импульсов. Подобный режим наноабляции позволяет создавать элементы дифракционной и интегральной алмазной оптики, обладающие высокой эффективностью и лучевой стойкостью.

Лазерный луч, давно ставший привычным инструментом в руках косметологов, набирает все большую популярность у реставраторов, имеющих дело с ценнейшими картинами, скульптурами и другими произведениями искусства. В тех случаях, когда другие методы неприменимы, именно лазер приходит на выручку. Самыми распространенными в реставраторском деле стали импульсные твердотельные лазеры на основе кристалла иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами неодима (Nd-YAG), с длиной волны 1.06 мкм и наносекундной длительностью импульсов. При интенсивности лазерного излучения около 10<sup>7</sup>–10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> происходит удаление поверхностного слоя загрязнения, не затрагива-

ющее материал оригинала. Так лазерная абляция позволяет быстро и безопасно очищать уникальные творения человеческих рук, изготовленные практически из любых материалов, от позднейших наслоений и загрязнений.

Какие же физические механизмы лежат в основе этих и многих других технологий?

## Физика процесса

В основе светогидравлического эффекта лежит способность конденсированных сред поглощать электромагнитное излучение. Феноменологически проникновение излучения в среду было описано еще в XVIII–XIX вв.: согласно закону Бугера–Ламберта–Бера, оно экспоненциально затухает с глубиной. На микроскопическом уровне для разных веществ механизмы поглощения лазерного излучения различны. В случае металлов практически всю электромагнитную энергию поглощают свободные электроны в очень тонком (толщиной всего 100 нм) приповерхностном слое мишени. За время  $\sim 10$  пс они передают полученную энергию кристаллической решетке металла, в результате чего последняя нагревается. По этой причине нагрев металлов лазерным излучением в широком диапазоне длин волн оказывается поверхностным. В полупроводниках поглощение определяется соотношением ширины запрещенной зоны и энергией кванта света — фотон «перебрасывает» электрон из валентной зоны в зону проводимости. Для кристаллических диэлектриков основной «агент», принимающий энергию лазерного излучения, — колебания их кристаллической решетки. Поглощение света полимерами и жидкостями в основном тоже определяется возбуждением колебательных (и колебательно-вращательных) уровней, только уже молекул. Эти вещества хорошо поглощают излучение с длинами волн в инфракрасной области спектра; для них лазерный нагрев, как правило, бывает объемным.

Под действием лазерного излучения на жидкости и твердые тела происходит их тепловое расширение. Оно приводит к генерации и распространению в мишени и окружающей среде импульсов давления и ударных волн. Если облучаемая поверхность свободна (т.е. не контактирует с другой конденсированной средой), возникающий при этом импульс давления (который обусловлен тепловым расширением мишени) в линейном приближении пропорционален производной лазерного импульса по времени. В случае широко распространенной колоколообразной формы последнего изменение давления приобретает характерный биполярный вид «бабочки», в котором за фазой сжатия следует фаза разрежения (такие волны легче представить себе бегущими по поверхности жидкости, а в «глу-

бинах вод» и в твердых телах этому соответствуют обычные звуковые волны). Если же облучаемая поверхность контактирует с поверхностью более плотной среды, например при лазерном воздействии на поглощающую жидкость через прозрачную стенку или дно кюветы, импульс давления становится униполярным импульсом сжатия.

Поскольку распространение волны в жидкости легче визуализировать, обратимся к яркой иллюстрации проявления светогидравлического эффекта при воздействии импульсного лазерного излучения на поглощающую жидкость в цилиндрической кювете. Формирующиеся на границе раздела импульсы сжатия фокусируются в центре кюветы и разбивают ее. На рис.1 приводятся последовательность кадров скоростной видеосъемки процесса облучения емкости с водой 140-наносекундным импульсом электроразрядного водород-фторного (HF) лазера с длиной волны около 3 мкм и энергией 2 Дж. Временной интервал между кадрами составляет 200 мкс. Показан момент воздействия лазерного импульса, а также динамика разрушения кюветы.

С точки зрения практических задач большой интерес представляет воздействие лазерного излучения на твердые мишени. Фокусировка импульсов сжатия позволяет получить рекордные значения давлений в веществе, вплоть до десятков и сотен гигапаскалей, при лазерном облучении мишеней сложной формы, в частности конических [2]. Если такой импульс, распространяясь по

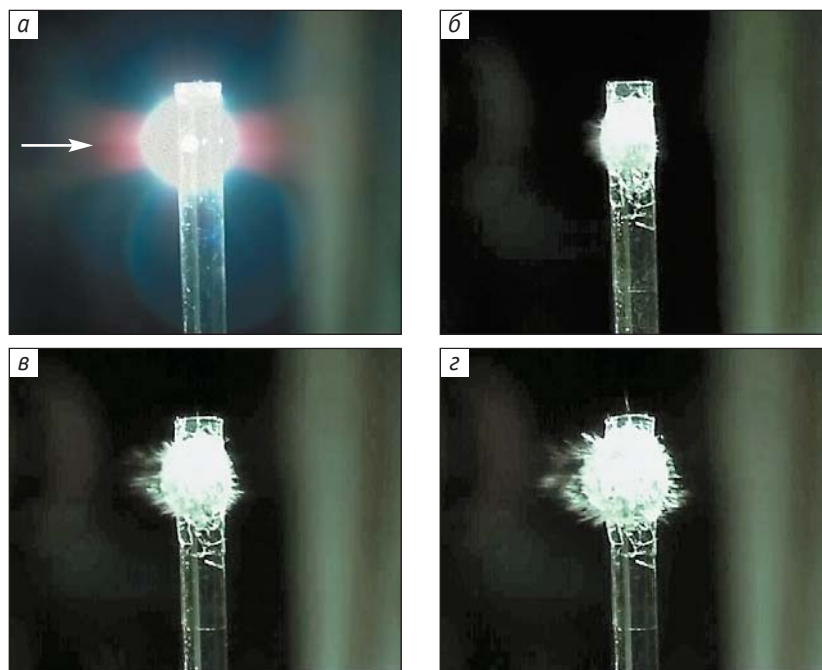


Рис.1. Облучение кюветы с водой импульсом HF-лазера: момент лазерного воздействия (а, стрелкой показано направление воздействия) и кювета спустя 200 (б), 400 (в), 600 мкс (г) после лазерного воздействия. Кювета подсвечивалась внешним источником белого света.

веществу, доходит до его свободной поверхности, то при отражении он преобразуется в импульс растяжения (отрицательного давления), отрывая фрагменты поверхности мишени (возникают так называемые откольные явления). На этом принципе основана лазерная методика изучения откольной прочности твердых тел, благодаря которой получены предельные значения прочности для многих технически важных материалов [3]. Использование этой уникальной методики позволяет вплотную подойти к теоретическому пределу отрицательных давлений в твердых телах, составляющему около 10–30 ГПа.

Когда плотность мощности падающего излучения на мишень достигает величины  $\sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, начинается плавление материала мишени. Это порождает дополнительный вклад в импульс давления, который определяется скоростью движения фронта плавления в глубь мишени и разностью плотностей жидкой и твердой фазы вещества. Если при плавлении плотность уменьшается (что справедливо для большинства материалов), вклад в давление будет положительным, в противоположном случае (например, для германия и кремния) на сигнале давления возникает узкий отрицательный провал [4].

При увеличении плотности мощности лазерного излучения до значений  $\sim 10^6$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> начинается интенсивное поверхностное испарение вещества мишени. В отличие от плавления, вклад поверхностного испарения в сигнал давления всегда положительный. Он приблизительно равен половине от давления насыщенного пара конкретного вещества при данной температуре его поверхности. С действием испарительного давления отдачи на мишень связаны идеи по лазерному ускорению легких летательных аппаратов.

Один из физических механизмов светогидравлического эффекта — объемное взрывное вскипание, или фазовый взрыв. Он реализуется в том случае, если при лазерном воздействии вещество мишени оказывается в метастабильном состоянии, перегретом существенно выше температуры кипения. Распад этого состояния сопровождается резким повышением давления и образованием большого количества новых границ раздела фаз «жидкость–пар» — кавитационных пузырей. При определенных условиях этот процесс может носить периодический, повторяющийся характер [5].

Дальнейшее увеличение интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени до величин  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> приводит к оптической ионизации паров вещества мишени и образованию плазменного факела, сопровождающемуся генерацией еще более мощных импульсов давления и ударных волн.

Теперь, вооружившись представлениями о самом эффекте, приведем несколько примеров встречи с ним. Сначала убедимся, что в научных исследованиях еще далеко не поставлена точка.

## Фотовольтаический эффект

Исследуя светогидравлический эффект, Прохоров с соавторами подкрашивали воду медным купоросом, чтобы создать полосу поглощения на длине волны рубинового лазера 694 нм. Разработка твердотельных и электроразрядных газовых лазеров трехмикрометрового диапазона дала возможность использовать воду без примесей, поскольку она имеет сильную полосу поглощения в этой области спектра.

Недавно ученые ИОФ РАН обнаружили эффект генерирования электрического сигнала (фотовольтаический эффект) при воздействии на чистую воду импульсного излучения твердотельного гольмиевого лазера с длиной волны 2.92 мкм и энергией в импульсе 10 мДж [6]. В этих экспериментах кювета, наполненная дистиллированной водой, помещалась между обкладками незаряженного конденсатора. При импульсном лазерном облучении свободной поверхности воды на обкладках конденсатора регистрировалась разность потенциалов с амплитудой  $\sim 10$  мВ. В последующих работах были использованы более мощные электроразрядные импульсные HF-лазеры с энергией до 2.5 Дж и длительностью импульса 140 нс, что позволило зарегистрировать электрические сигналы с амплитудой до 20 В [7]. В этом случае обкладками конденсатора служили два кольцевых электрода, расстояние между которыми составляло от 3 до 8 см. На рис.2,а приводится принципи-

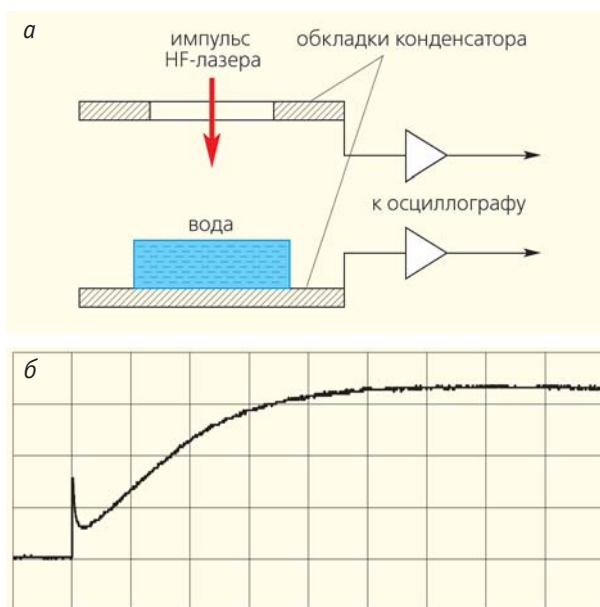


Рис.2. Принципиальная схема эксперимента по исследованию фотовольтаического эффекта при лазерном воздействии на свободную поверхность воды (а); осциллограмма электрического сигнала при облучении воды импульсом HF-лазера с энергией 2.3 Дж (б, шкала по оси x — 500 мкс/дел., по оси y — 5 В/дел.).

альная схема эксперимента по исследованию фотовольтаического эффекта при лазерном воздействии на свободную поверхность воды, а рис.2,б показывает типичную осциллограмму электрического сигнала при облучении воды импульсом HF-лазера с энергией 2.3 Дж.

Когда импульс лазерного излучения с длиной волны 3 мкм воздействует на открытую поверхность воды, она сначала нагревается в приповерхностном слое толщиной всего несколько микрометров. Из-за интенсивного поверхностного испарения и процессов теплопроводности максимум температурного профиля не располагается на самой поверхности, а смещен в глубь жидкости на расстояние около 0.5 мкм. Повышенная температура в перегретом слое сдвигает константу диссоциационного равновесия воды в сторону роста концентрации ионов  $H^+$  и  $OH^-$ .

Наличие резких температурных градиентов, возникающих в воде в процессе импульсного лазерного нагрева, приводит к появлению градиентов концентраций и диффузионных потоков ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Поскольку коэффициент диффузии ионов  $H^+$  превосходит коэффициент диффузии ионов  $OH^-$  почти вдвое, в воде происходит первоначальное разделение зарядов: область вблизи температурного максимума оказывается обедненной ионами  $H^+$ , т.е. заряженной отрицательно, а области вблизи поверхности воды и в глубине жидкости — положительно. Процесс диффузионного разделения зарядов длится около 300 нс.

При достижении температуры предельного перегрева в максимуме температурного профиля происходит взрывное вскипание и образуется паровая полость, границы которой оказываются разноименно заряженными. Динамика развития паровой полости, а также процессы переноса зарядов внутри нее определяют эволюцию электрического сигнала в течение 100–200 мкс. Этим быстротекущим процессам соответствует острый пик на сигнале, показанном на рис.2,б. Дальнейшее расширение парового пузыря приводит к сбросу (отколу) и разбрызгиванию перегретого приповерхностного слоя жидкости. В процессе разбрызгивания мельчайшие капли воды дополнительно электризуются. Перемещение заряженной паро-капельной смеси между обкладками конденсатора в течение 2–4 мс дает основной вклад в электрический сигнал на рис.2,б и определяет его амплитуду.

Этот пример показывает, что такое простое, казалось бы, явление, как воздействие лазерного излучения на поверхность дистиллированной воды, в действительности оказывается сложным многомасштабным и многостадийным процессом, охватывающим пять порядков по времени (от десятков наносекунд до единиц миллисекунд) и пространству (от десятых долей микрометра до единиц сантиметров).

## Динамика паровой полости

Не менее интересный и важный для приложений случай реализуется при лазерном воздействии на нижнюю поверхность водного столба через прозрачное для излучения дно кюветы [8]. Отличие от предыдущего случая состоит в том, что процессы интенсивного испарения и разбрызгивания заряженных капель с открытой поверхности воды здесь полностью исключены. Однако фотовольтаический эффект по-прежнему имеет место. На рис.3,а показана типичная осциллограмма электрического сигнала, на которой отчетливо выделяются два наиболее выраженных пика. В ходе экспериментов было установлено, что временной интервал между ними линейно зависит от энергии облучения.

Возникновение первого пика связано с процессами первоначального диффузионного разде-

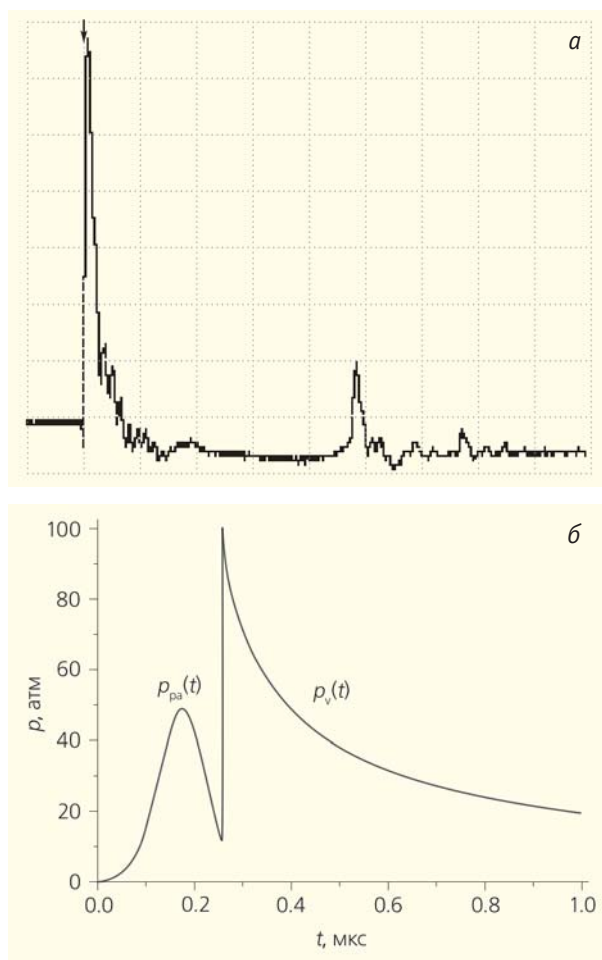


Рис.3. Осциллограмма электрического сигнала при облучении нижней поверхности водного столба импульсом HF-лазера с энергией 1.3 Дж (а, шкала по оси  $x$  — 250 мкс/дел., по оси  $y$  — 50 мВ/дел.). Давление, действующее на водный столб, в зависимости от времени при плотности лазерной энергии в пятне облучения 0.22 Дж/см<sup>2</sup> (б).

ления зарядов вблизи максимума температурного профиля, последующего взрывного вскипания и расширения паровой полости. Необходимо подчеркнуть, что последняя формируется в микрометровом слое вблизи дна кюветы из зародышей газовой фазы, которые, расширяясь и сливаясь друг с другом, образуют однородный квазиплоский пузырь. В момент возникновения полости давление в ней соответствует давлению насыщенного пара при температуре предельного перегрева (583 К), т.е. примерно на два порядка превосходит атмосферное. Под действием разности давлений внутри полости и внешнего атмосферного паровая полость начинает быстро расширяться, толкая при этом вверх водный столб. Результаты расчета давления, действующего на водный столб, в зависимости от времени при плотности лазерной энергии в пятне облучения  $0.22 \text{ Дж/см}^2$  приведены на рис.3,б. Помимо давления пара в полости  $p_v(t)$  в нем учитывается фотоакустическое давление  $p_{ра}(t)$ , которое обусловлено тепловым расширением тонкого слоя воды, нагреваемого лазерным импульсом у дна кюветы. В случае взрывного вскипания воды относительный вклад фотоакустического давления в ускорение водного столба незначителен, поскольку оно отлично от нуля лишь во время действия лазерного импульса. Однако если интенсивность лазерного импульса недостаточна для взрывного вскипания воды, вклад  $p_{ра}$  становится определяющим.

Расширение паровой полости составляет вторую стадию процесса, сопровождающего воздействие излучения НФ-лазера на воду. Тогда как длительность первой стадии «начального нагрева воды» не превышает полной длительности лазерного импульса (около 300 нс), вторая стадия продолжается все время, пока давление пара в полости превышает внешнее атмосферное давление (10–30 мкс).

Динамика водного столба и паровой полости на временах, много больших 10 мкс, составляет третью стадию движения водного слоя при взаимодействии с излучением. Здесь воду можно считать несжимаемой жидкостью, а движение водного столба — равноускоренным с отрицательным ускорением, пропорциональным атмосферному давлению. В этом случае полное время движения водного столба, которое совпадает с длительностью существования паровой полости, определяется удвоенным интегралом по времени от действующего на водный столб полного давления, нормированного на величину атмосферного давления. Долгое существование полости после уменьшения давления в ней ниже атмосферного обусловлено инерцией движения водного столба, приобретающего скорость в начальной фазе расширения полости. Оно длится от 200 мкс до 1.2 мс (в линейной зависимости от энергии лазерного импульса). Сравнение расчетного времени существования паровой полости с временным интер-

валом между двумя наиболее выраженными пиками на электрическом сигнале показало их хорошее соответствие. Это обстоятельство свидетельствует о том, что второй пик на сигнале возникает вследствие электрических явлений во время коллапса паровой полости. Такими явлениями могут быть электрический пробой и ионизация пара. Они могут сопровождаться различными плазмохимическими процессами, в частности диссоциацией молекул воды, образованием активных форм кислорода, выделением газообразного водорода.

Плазмохимические процессы, протекающие при воздействии лазерного излучения на поглощающие жидкости, представляют огромный интерес для целого ряда приложений в биологии и медицине, одно из которых будет рассмотрено ниже. Здесь же отметим, что для осуществления плазмохимических процессов в жидкости наиболее эффективным оказалось не единичное, хотя и мощное (~1 Дж), лазерное воздействие, а импульсно-периодический режим, в котором относительно слабые (~1 мДж) лазерные импульсы следуют с частотой 1 кГц и выше.

### Лазерный пробой воды и генерация водорода

Рассмотрим, что происходит при фокусировке такого импульсно-периодического излучения неодимового (Nd-YAG) лазера в объем воды. В воде всегда есть растворенные газы из воздуха, и их растворимость уменьшается с ростом температуры жидкости. Вода практически прозрачна на длине волны 1.06 мкм, но все же небольшое поглощение, обусловленное либрационными колебаниями молекул, присутствует. Поглощение части излучения локально нагревает воду внутри лазерного пучка, в результате чего появляется пузырь растворенного в ней газа.

Не все лазерное излучение поглощается пузырьком — его часть отражается вследствие полного внутреннего отражения света на границе пара и жидкости. Однако та часть излучения, которая вошла в пузырек, падает на противоположную границу раздела фаз и испаряет воду внутрь него. Легко видеть, что доля вошедшего в пузырек лазерного пучка тем больше, чем больше радиус пузырька. Тем самым в системе существует положительная обратная связь, и с новыми поглощенными лазерными импульсами радиус пузырька растет взрывообразно. При этом создаются условия для электрического пробоя пара и плазмообразования внутри пузырька. Пробой среды — это образование в ней электронной лавины, в которой каждый электрон рождает новый (известный пример пробоя — молния). В воде электрон не может набрать нужной для лавины энергии, так как его длина свободного пробега в жидкости мала. Пар

внутри пузырька — относительно разреженная среда, в ней электроны способны набрать энергию, необходимую для образования лавины. Такой пробой пара может происходить благодаря рассмотренному выше фотовольтаическому эффекту. Небольшая разность потенциалов на масштабах пузырька микрометровых размеров создает электрическое поле, достаточное для пробоя и плазмообразования.

Если концентрация пузырьков в перетяжке лазерного импульса достаточно велика, то отдельные плазменные области могут перекрываться, образуя единый плазменный канал, в котором происходит основное поглощение энергии лазерного импульса. При этом никаких электродов к жидкости не прикладывается, плазменный канал как бы подвешен в ней (рис.4). Время жизни плазмы сопоставимо с длительностью лазерного импульса — в наших условиях около 10 нс. После окончания лазерного импульса плазма рекомбинирует. Спектр поглощения плазмы — сплошной (белый). Он обусловлен тормозным излучением электронов, теряющих свою энергию в поле положительных ионов.

Плазма взаимодействует с парами воды, в результате чего происходит диссоциация молекул на водород и кислород. По мере увеличения времени лазерного облучения начинает идти обратная реакция слияния кислорода с водородом, сопровождающаяся микровзрывами пузырьков, появившихся в лазерный пучок [9].

Интересно отметить, что скорость лазерной генерации водорода в спиртах оказывается на два порядка выше, чем в воде. По-видимому, это обусловлено совместным действием плазмы и прямого пиролиза спиртов вследствие высокой темпе-

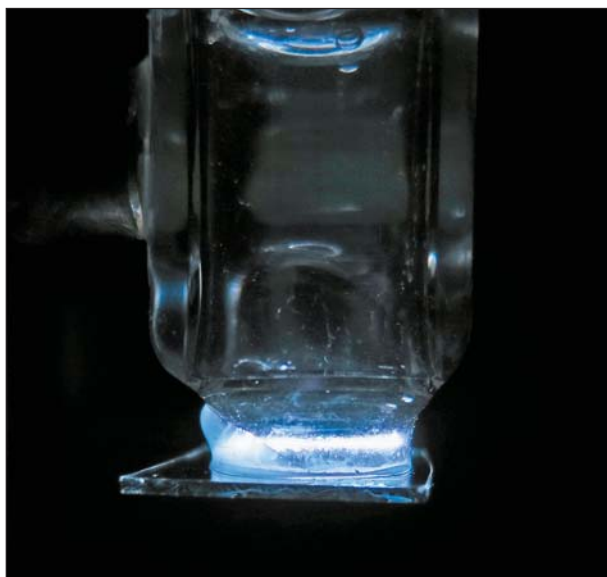


Рис.4. Плазменное кольцо при облучении воды лазерным пучком, сканирующим жидкость по окружности.

ратуры, достигаемой при пробое жидкости. Такой процесс потенциально представляет интерес для водородной энергетики, так как получение водорода из спиртов может быть альтернативой генерации водорода с помощью электролиза воды.

## Двухволновая лазерная литотрипсия

Говоря о практическом использовании светогидравлического эффекта, имеет смысл остановиться на самом впечатляющем — в здравоохранении. Среди его разнообразных медицинских приложений сосредоточимся на разработанном и внедренном в клиническую практику сотрудниками ИОФ РАН лазерном хирургическом комплексе «Лазурит». Комплекс состоит из двух лазерных устройств, совмещенных в одном приборе: скальпеля-коагулятора на основе мощного хирургического лазера и лазерного литотриптора, т.е. лазера для разрушения камней в органах человека [10]. Возможности двух разных лазеров, объединенных в одном комплексе, обеспечивают решения во всем диапазоне задач, связанных как с рассечением, абляцией и коагуляцией тканей, так и с разрушением твердых конкрементов при лечении мочекаменной болезни.

Один из самых распространенных методов лечения мочекаменной болезни — метод дистанционной ударно-волновой литотрипсии, когда фрагментация камней происходит дистанционно, за счет фокусировки в область воздействия ультразвуковых волн. Однако с развитием эндоскопической хирургии все большее распространение находят контактные методы разрушения камней за счет разнообразных способов воздействия: пневматических, ультразвуковых, электро-разрядных, лазерных, осуществляемых с использованием эндоскопического инструментария, который доставляет «агента» к месту его работы. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, их обсуждение, разумеется, выходит за рамки данной статьи, но одним из самых эффективных и безопасных оказывается метод лазерной литотрипсии.

Наиболее распространены лазерные литотрипторы на основе гольмиевых лазеров с длительностью импульса в 400–600 мкс. Их действие основано на фототермическом механизме воздействия, когда доставленное по световолокну лазерное излучение, поглощаясь веществом камня и водой (она находится внутри имеющихся в камне неоднородностей), ведет к его относительно медленному нагреву. За счет локального нагрева происходит и разрушение, и химическое разложение камня.

В основе же работы созданного в ИОФ РАН лазерного литотриптора лежит не фототермический, а знакомый нам светогидравлический эффект. В литотрипторе комплекса используется твердо-

тельный лазер на базе кристалла Nd:YAlO<sub>3</sub>, генерирующий микро-секундные импульсы основной длины волны 1079.6 нм и второй гармоники 539.8 нм.

Воздействие такого двухволнового излучения на камень, погруженный в жидкость, оказывается нелинейным и включает в себя несколько стадий (рис.5) [11]. На первой стадии происходит оптический пробой на поверхности камня и образование плазменной искры — за счет поглощения камнем лазерного излучения с длиной волны 539.8 нм, имеющего энергию не более 30% от энергии всего импульса. Лазерное излучение с длиной волны 1079.6 нм, которое составляет основную часть энергии импульса, поглощается уже образованной плазмой. Она нагревает окружающую жидкость до температуры, существенно превышающей температуру кипения. На второй стадии происходит взрывное вскипание перегретой жидкости и образование кавитационного пузыря на поверхности камня. Развитие кавитационного пузыря и распространение ударной волны при его коллапсе составляет заключительную стадию лазерного воздействия. В итоге через ~700 мкс с момента падения лазерного излучения на поверхность камня происходит разрушение последнего благодаря воздействию ударной волны, генерируемой при коллапсе кавитационного пузыря.

В основе разрушения камней при контактной лазерной литотрипсии (рис.6), так же как и при дистанционной ударно-волновой литотрипсии, лежит селективность воздействия ударных волн на твердые, хрупкие (камень) и мягкие, упругие (мягкие ткани) материалы. Давление ударной волны не наносит вреда мягким тканям, пока пиковое давление не превысит порогового значения ≈1 кбар. Однако оно может разрушать камни при меньших значениях, поскольку в хрупком материале относительные малые переме-

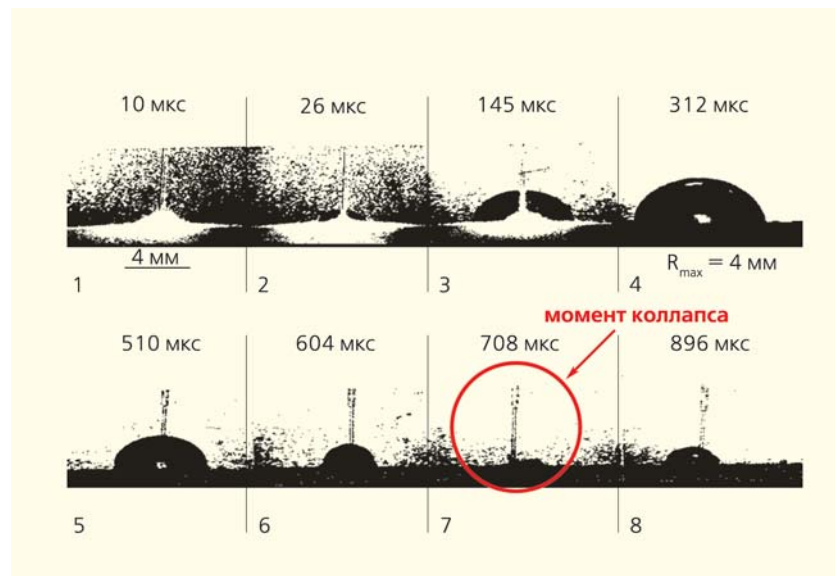


Рис.5. Теневые фотографии процесса развития кавитационного пузыря, который образуется при взаимодействии лазерного излучения микросекундной длительности с камнем, погруженным в жидкость. Лазерное излучение подводится к поверхности камня по волокну, просматриваемому в верхней части каждого кадра. Этапы развития кавитационного пузыря: 1 — оптический пробой и плазмообразование на поверхности камня; 2–4 — взрывное вскипание жидкости и образование кавитационного пузыря; 5–6 — процесс схлопывания пузыря под действием давления окружающей среды; 7 — момент коллапса кавитационного пузыря и формирование ударной волны, разрушающей камень [11].

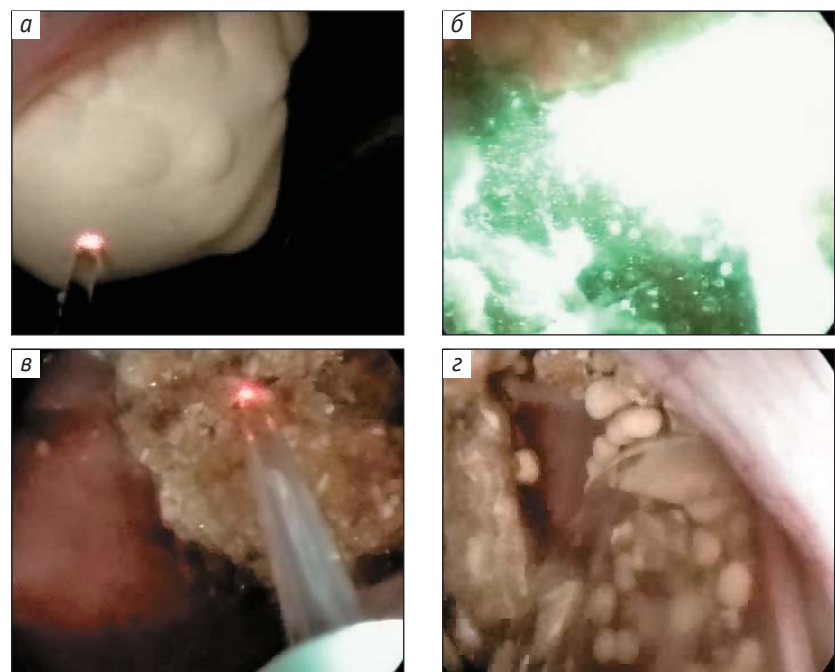


Рис.6. Лазерная нефролитотрипсия двухволновым излучением микросекундной длительности: изображения камня в почке и оптического волокна для доставки излучения, торец которого подсвечен излучением пилотного лазера (а), процесс воздействия и фрагментация камня (б), раздробленная часть камня (в, просматривается торец оптического волокна), элиминация фрагментов камня из почки (г).

щения приводят к образованию трещин. Это обстоятельство оказывается основным преимуществом двухволновой лазерной литотрипсии по сравнению с другими лазерными методами литотрипсии. Кроме того, благодаря оптимально подобранным параметрам лазерного воздействия достигается высокая эффективность и скорость фрагментации камней любой локализации и химического состава, причем не разрушается волоконно-оптический инструмент для доставки лазерного излучения. Все это в совокупности приводит к радикальному уменьшению числа осложнений и сокращению послеоперационного периода лечения пациентов.

Принципиально важным моментом был выбор длительности лазерного импульса: она составляет величину ~1 мкс. С одной стороны, это позволяет с достаточной эффективностью обеспечить преобразование основной частоты излучения во вторую гармонику, т.е. двухчастотность, с другой — при такой длительности пиковая мощность излучения недостаточно велика для того, чтобы разрушить выходной торец оптического волокна. Следует также подчеркнуть, что подобная длительность импульса необычна для

твердотельного лазера; она достигается с помощью кварцевого волокна требуемой длины, помещенного в резонатор. Такой метод создания оптической линии задержки в резонаторе был тоже предложен в ИОФ РАН [12].

Лазерный хирургический комплекс «Лазурит» зарегистрирован и внесен в реестр изделий медицинского назначения в России, на Украине, в Белоруссии и Казахстане. На сегодняшний день 25 действующих установок работают в больницах России и стран СНГ (в одном только Научно-клиническом центре РЖД в Москве на этом комплексе выполняется более 400 операций в год).

\* \* \*

Надеемся, нам удалось наглядно продемонстрировать, что открытый Прохоровым и соавторами более 50 лет назад светогидравлический эффект продолжает ставить перед учеными сложные проблемы, решение которых открывает перспективы создания новых технологий в самых передовых отраслях человеческой деятельности. Прозорливость и талант Александра Михайловича навсегда вписали его имя в «Золотую книгу мировой науки». ■

## Литература

1. Аскаръян Г.А., Прохоров А.М., Чантурия Г.Ф. и др. Луч ОКГ в жидкости // ЖЭТФ. 1963. Т.44. Вып.6. С.2180–2182.
2. Красюк И.К., Семенов А.Ю., Чарахчян А.А. Использование конических мишеней в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу // Квантовая электроника. 2005. Т.35. №9. С.769–777.
3. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Воронов В.В. и др. Особенности поведения вещества в области отрицательных давлений, создаваемых действием лазерного импульса пикосекундной длительности // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №3. С.246–251.
4. Веселовский И.А., Жирыков Б.М., Попов Н.И., Самохин А.А. Фотоакустический эффект и фазовые переходы в полупроводниках и металлах при импульсном воздействии лазерного излучения // Труды ИОФАН. Т.13: Действие лазерного излучения на поглощающие конденсированные среды. М., 1988. С.108–120.
5. Андреев С.Н., Орлов С.В., Самохин А.А. Моделирование взрывного вскипания при импульсном лазерном воздействии // Труды ИОФАН. Т.60: Действие лазерного излучения на поглощающие среды. М., 2004. С.127–147.
6. Ильичёв Н.Н., Кулевский Л.А., Пашинин П.П. Фотовольтаический эффект в воде при воздействии на нее излучения YSGG:Cr<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup>:Ho<sup>3+</sup>-лазера с длиной волны 2.92 мкм // Квантовая электроника. 2005. Т.35. №10. С.959–961.
7. Andreev S.N., Ilichev N.N., Firsov K.N. et al. Generation of an electrical signal upon the interaction of laser radiation with water surface // Laser Physics. 2007. V.17. №8. P.1041–1052.
8. Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г. и др. Временная структура электрического сигнала при взаимодействии излучения HF-лазера с поверхностью воды // Квантовая электроника. 2009. Т.39. №2. С.179–184.
9. Barmina E.V., Simakin A.V., Shafeev G.A. Hydrogen emission under laser exposure of colloidal solutions of nanoparticles // arXiv:1602.08333.
10. Helfmann J., Mikbailov V.A., Konov V.I. et al. Efficiency of stone fragmentation by long pulses of a Q-switched Nd:YAG laser // Proceedings SPIE. 1992. V.1643. P.78–85.
11. Rink K., Delacretaz G., Salatbe R.P. Fragmentation process of current laser lithotriptors // Lasers Surg. Med. 1995. V.16. P.134–146.
12. Дианов Е.М., Исаев С.К., Корниенко Л.С. и др. Лазер со световодным резонатором // Квантовая электроника. 1976. Т.3. №11. С.2503–2504.

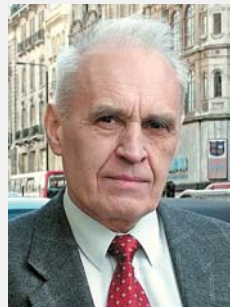


# Отечественная волоконная оптика: остановленный взлет

академик Е.М.Дианов

Вернемся на 45 лет назад, 1970 г. Событие мирового значения: фирмой «Corning Glass» (США) изготовлены стеклянные волоконные световоды с низкими оптическими потерями (<20 дБ/км для красного света). В 1980 г. запущены первые коммерческие системы волоконно-оптической связи со скоростью передачи информации 45 Мбит/с. Началось бурное развитие оптической связи, которая была уже очень нужна человечеству и стала движущей силой в развитии всей волоконной оптики. Возникли новые применения волоконных световодов: волоконные лазеры и волоконно-оптические датчики.

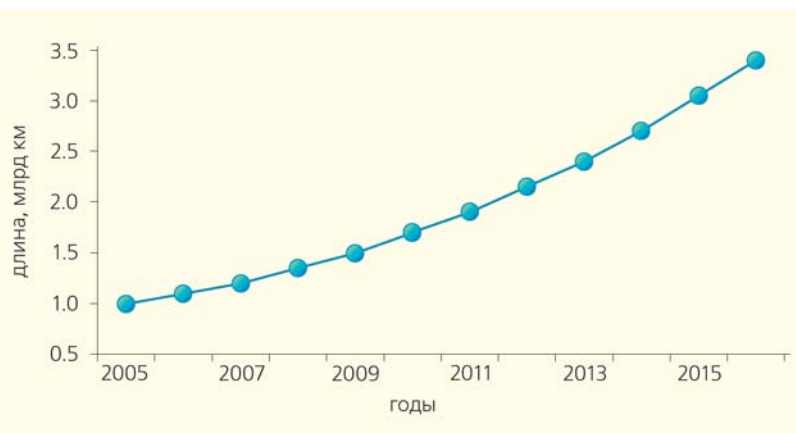
2010 г. Все континенты соединены подводными волоконно-оптическими линиями связи. Общая длина волоконных световодов, проложенных в подводных и наземных системах, составила 1.5 млрд км. В 2015 г. эта цифра удвоилась. Скорость передачи информации в коммерческих линиях достигла 10 терабит/с ( $10 \cdot 10^{12}$  бит/с) по одному волоконному световоду, а в экспериментальных системах — 100 Тбит/с. Годовой рост потребности развитых стран в передаче информации (на 30–40% в год) заставил стремиться к скорости передачи данных по одному световоду на уровне петабит/с ( $10^{15}$  бит/с)



*Евгений Михайлович Дианов, академик, доктор физико-математических наук, научный руководитель Научного центра волоконной оптики РАН. Лауреат Государственных премий СССР и РФ. Область научных интересов — лазерная физика, волоконная оптика.*

**Ключевые слова:** волоконный световод, высокочистые вещества, стекло.  
**Key words:** optical fiber, high purity substances, glass.

и выше. Эффективные волоконные лазеры с непрерывной выходной мощностью в несколько десятков киловатт производятся в промышленных масштабах, как и распределенные волоконно-оптические датчики различных физических полей, которые прокладываются вдоль мостов, железных дорог, нефтяных и газовых трубопроводов, в нефтяных скважинах для контроля их работы.



Суммарная протяженность волоконных световодов в оптических линиях связи.

Мало кто в 70-х годах XX в. предвидел такие возможности волоконных световодов. Одним из них был академик Александр Михайлович Прохоров. Тогда он возглавлял лабораторию колебаний Физического института Академии наук, был руководителем Отделения А ФИАН (с 1983 г. Институт общей физики АН СССР — ИОФАН) и академиком-секретарем Отделения общей физики и астрономии АН СССР. Почему же во второй половине прошлого века в мире так остро встал вопрос о разработке стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями?

## В погоне за скоростью

История развития человеческого общества — это и история непрерывного совершенствования средств связи и передачи информации. По-настоящему эффективная связь зародилась благодаря интенсивному развитию науки и техники в XIX в., но потребности в обмене информацией всегда превышали технические возможности. XX в. характеризовался бурным внедрением радиосвязи. При трансляции данных с помощью несущего излучения (в данном случае — радиоволн) скорость передачи растет с увеличением его частоты. Поэтому прогресс шел в сторону больших частот радиоизлучения, или коротких длин волн, — вплоть до сантиметров и миллиметров. Несмотря на высокий уровень развития радиосвязи в передовых странах мира, в том числе в Советском Союзе, информационный бум поставил вопрос о переходе к оптическому несущему излучению, что обещало увеличение скорости передачи данных в  $10^4$ – $10^5$  раз.

Изобретение в 1960 г. лазеров — источников мощного и высоконаправленного оптического излучения — давало веское основание для разработки систем оптической связи. Поэтому одними из первых экспериментов с лазерами стали попытки передачи оптической информации через свободную атмосферу. Они проводились в ряде стран (в том числе в СССР), но результат был один и тот же: атмосфера не может служить подходящей средой для надежной передачи данных с помощью света на значительные расстояния (прежде всего из-за изменчивости метеорологических условий). Другой передающей среды с низкими оптическими потерями тогда не было — стеклянные волоконные световоды, которые имели высокие оптические потери порядка 1000 дБ/км (свет ослаблялся вдвое на длине 3 м), естественно, тоже не подошли. И казалось, что блестящая идея сделать высокоскоростные системы оптической связи не может быть реализована. Однако в 1966 г. Ч.Као, китаец, работавший в Англии в Стандартной телекоммуникационной лаборатории, опубликовал статью, в которой проанализировал источники оптических потерь в стеклах. Он показал, что по-

тери в основном обусловлены примесями, прежде всего, переходных металлов (Fe, Cu, Ni и др.). При снижении суммарного содержания примесей до уровня  $10^{-6}$  мол.% падение мощности излучения в стеклах может стать ниже 20 дБ/км (т.е. уменьшение в два раза на 150 м), причем и эта величина намного превышает нижний предел, обусловленный фундаментальными механизмами.

Статья Као сыграла исключительно важную роль в развитии современной волоконной оптики, так как четко указала путь для создания стеклянных световодов с малыми оптическими потерями. Однако реализовать его предложения было чрезвычайно сложно, поскольку получить столь низкое содержание примесей в стекле при существующей технологии варки стекол было невозможно. Нужно было разработать новую технологию изготовления стекол и волоконных световодов из них с использованием высокочистых летучих исходных материалов. Проблема усложнялась еще и тем, что необходимые соединения надо было сначала создать, что тоже было нелегко. Это и удалось сделать специалистам фирмы «Corning Glass» в 1970 г., когда они впервые изготовили стеклянные волоконные световоды с оптическими потерями 17 дБ/км на длине волны 0.63 мкм.

В журнальной статье невозможно подробно описать всю историю развития волоконной оптики в стране. Моей основной целью, в связи с известным поводом, было продемонстрировать выдающийся вклад в это важнейшее направление современной науки и техники Александра Михайловича Прохорова.

## Решение и первые шаги

Информация об изготовлении первых световодов с низкими потерями очень заинтересовала Прохорова. Он внимательно следил за публикациями на эту тему, спрашивал у сотрудников, вернувшихся из зарубежных командировок, какие здесь есть новости. Чувствовалось, что он пытается оценить возможные характеристики волоконных световодов и перспективы их применения. После очередного снижения оптических потерь до уровня 5–7 дБ/км, достигнутого другой американской фирмой, «AT&T Bell Lab», в 1972–1973 гг., Александр Михайлович твердо решил заняться созданием волоконных световодов с малыми потерями. Он стал подыскивать подходящего исполнителя для решения этой задачи. Однако, несмотря на все усилия привлечь сотрудников лаборатории колебаний многообещающими перспективами приложений, найти желающих изменить свою научную тематику ему не удавалось. Все же один из сотрудников согласился более детально ознакомиться с проблемой. Приблизительно через месяц он высказал Прохорову свое мнение, что в СССР невозможно изготовить подобные световоды, поскольку

нет ни особо чистых исходных материалов, ни соответствующих технологий. Интересна реакция Александра Михайловича. Он не стал спорить, что-то доказывать, а просто сказал «спасибо». Он допускал, что все названное на самом деле надо создавать, к чему сотрудник не был готов.

В конце 1973 г. Прохоров предложил заняться этой проблемой мне и дал две последние статьи, в которых сообщалось об изготовлении волоконных световодов на основе кварцевого стекла с низкими оптическими потерями. Я прочитал статьи, тематика мне очень понравилась, и я согласился.

Почему я согласился? Я уже проработал в лаборатории колебаний 13 лет и ясно представлял организационные способности, высокий научный потенциал и обширные связи Прохорова с другими организациями. Мы все были убеждены, что если Александр Михайлович берет за какую-либо проблему, то он уверен, что ее нужно и можно решить. Кроме того, было очень престижно работать непосредственно под руководством академика Прохорова над крупной задачей.

Получив мое согласие, Александр Михайлович сразу начал осуществлять планы, обдуманные им заранее. Он сказал, что без химиков технологию мы разработать не сможем, поэтому сначала надо пойти к академику Н.М.Жаворонкову и обсудить с ним нашу проблему. Жаворонков был в то время академиком-секретарем Отделения физикохимии и технологии неорганических материалов. Мы отправились к Николаю Михайловичу в Институт общей и неорганической химии, где тот был директором. Александр Михайлович изложил суть задачи, подчеркнув, что для ее решения необходимы летучие высокочистые соединения кремния, германия и других элементов (они были использованы в опубликованных работах). Жаворонков с удовольствием сообщил, что синтезом таких соединений занимается в Горьком, в Институте химии его Отделения (ИХАН), заместитель директора член-корреспондент Г.Г.Девятых. Он тут же вспомнил, что Григорий Григорьевич сейчас находится в Москве. Кроме того, он рекомендовал обратиться в Институт химии силикатов (из его же Отделения), где синтезируются и исследуются различные стекла. После окончания разговора с Жаворонковым Александр Михайлович посоветовал мне не откладывая встретиться с Девятыми.

Я нашел Григория Григорьевича, рассказал о беседе с Жаворонковым и о задаче, которую Прохоров собирается решать. Реакция Девятых была положительной и четкой: «Мы всегда готовы участвовать в решении крупных проблем». Эта встреча состоялась в декабре 1973 г., и Григорий Григорьевич пригласил меня приехать через месяц в его институт для более детального обсуждения.

Как и договаривались, я приехал в Горький в январе 1974 г. и впервые оказался в ИХАН. Григорий Григорьевич встретил меня дружелюбно,

рассказал об институтских исследованиях, затем провел по лабораториям и познакомил с ведущими сотрудниками. Наибольшее впечатление произвели на меня высокие ректификационные колонны для очистки летучих соединений.

После этого уже я рассказал о технологии изготовления волоконных световодов с использованием высокочистых летучих соединений, разработанной в «Corning Glass» и «AT&T». На многие вопросы я ответить не мог, так как в статьях описание технологии практически отсутствовало. Но главное Григорий Григорьевич понял: «Мы можем синтезировать высокочистые летучие гидриды и хлориды кремния и других элементов, которые потребуются для изготовления стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями. Будем работать!»

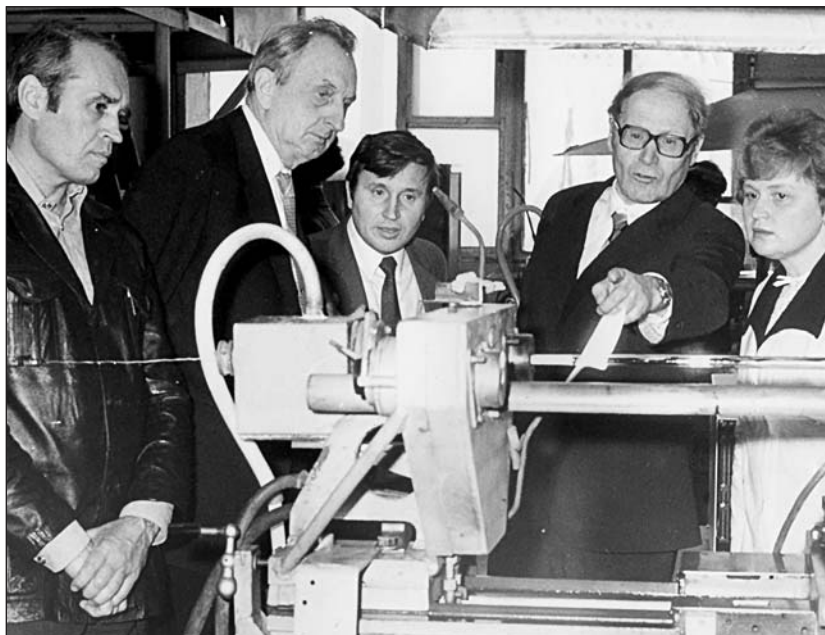
Александр Михайлович был очень доволен результатами моей поездки, и работа началась. Здесь уместно отметить, что совместные проекты с этим институтом\* успешно продолжают и в настоящее время, то есть более 40 лет спустя.

### Семидесятые: начало

Итак, в 1974 г. ФИАН и ИХАН занялись технологией изготовления волоконных световодов на основе кварцевого стекла (именно из него были сделаны зарубежные «рекордсмены»): надо было научиться изготавливать заготовки и перетягивать их в волоконные световоды. Заготовка представляла собой цилиндрический стержень, который состоял из стеклянной сердцевины и окружающей ее оболочки — тоже стеклянной, но с более низким показателем преломления (такая конструкция позволяет удерживать в световоде луч света за счет явления полного внутреннего отражения). Разрабатывать технологию заготовок было решено в ИХАН, так как там синтезировали высокочистые хлориды кремния, германия, бора и других элементов, используемые в качестве исходных материалов, а сотрудники обладали необходимой культурой работы с веществами особой чистоты [1].

Сначала неясно было, кто и где станет вытягивать световоды из заготовок, изготовленных в ИХАН. После обсуждения решили соорудить небольшую вытяжную установку там же, поскольку экспресс-измерения на световодах дают первичную информацию о заготовках. Более сложную установку, для более серьезных исследований процесса вытяжки, запланировали в ФИАН, где разрабатывался полный набор методов измерения характеристик заготовок и волоконных световодов.

\* В 1988 г. на базе его отдела химии особо чистых веществ по инициативе академика Девятых был образован Институт химии высокочистых веществ (ИХВВ РАН); сегодня он носит имя своего основателя.



Обсуждение процесса изготовления заготовки волоконного световода. Слева направо: Е.М.Дианов, А.М.Прохоров, А.Н.Гурьянов, Г.Г.Девятых, С.П.Елиева.

Одновременно с нами в Государственном оптическом институте (ГОИ) тоже начали работать над созданием волоконных световодов с низкими потерями, но на базе не кварцевого стекла, а многокомпонентных стекол. Планы подобных работ обсуждались и в Институте радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ), так что конкуренты (в хорошем смысле этого слова) подстегивали нас.



Академики А.М.Прохоров и Г.Г.Девятых обсуждают ход совместных работ.

Прохоров уделял огромное внимание этим работам, помогая преодолевать различные проблемы. А их было немало, ведь мы начинали практически «с нуля»: отсутствовали прецизионное оборудование (станки) для изготовления заготовок, приборы, контролирующие технологический процесс, вытяжная установка, стенды для измерения параметров волоконных световодов и, конечно, опыт соответствующих работ. А в моей группе тогда было всего два научных сотрудника. Александр Михайлович часто приезжал в ИХАН и обсуждал на месте все наиболее важные вопросы. Его советы и помощь в борьбе с трудностями (финансовыми, приборными и др.) дали результат — в начале 1975 г. в СССР впервые\* были изготовлены волоконные световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, боросили-

катной оболочкой и оптическими потерями менее 10 дБ/км в спектральной области 0.7–0.9 мкм [2]. В нашем успехе следует отметить исключительно важную роль Девятых. Талантливый ученый, специалист мирового уровня в области высококачественных веществ, он смог в очень короткие сроки организовать эффективную работу своих сотрудников по очистке летучих соединений кремния, германия, бора и других элементов и использованию их для изготовления волоконных световодов. Помогали не только деловые, но и очень дружеские отношения Александра Михайловича и Григория Григорьевича.

Прохоров был очень доволен результатами и сообщил о них заместителю заведующего оборонным отделом ЦК КПСС Н.Н.Детиннову. Тот попросил Александра Михайловича прислать к нему непосредственного исполнителя работ для уточнения деталей, и я рассказал Детиннову, как мы изготовили такие волоконные световоды. На вопрос, какие есть проблемы, я ответил, что не хватает современного технологического оборудования и некоторых приборов. Николай Николаевич заверил, что руководство страны понимает важность решаемой проблемы и направил меня за реальной помощью в Военно-промышленную комиссию (ВПК). Там меня ждали несколько человек, которые попросили рассказать, что и как мы делаем. Я начал объяснять, что мы стараемся создать волоконные световоды с низкими оптическими потерями и уже изготовили первые образ-

\* В ИРЭ волоконные световоды с низкими оптическими потерями были изготовлены в 1976 г.

цы, но был прерван дружным смехом. На вопрос, что я сказал смешного, прозвучал ответ: «В ГОИ уже два постановления правительства по этой проблеме завалили, а вы там, в Академии, хотите эту исключительно сложную технологическую проблему решить!». Я снова пошел к Дитинову и рассказал ему о встрече в комиссии. Он снял трубку и приказал готовить решение ВПК о поддержке наших работ.

После изготовления первых световодов с низкими потерями Прохоров был серьезно озабочен отсутствием современного технологического оборудования для изготовления заготовок и вытяжки волоконных световодов. Он понимал, что сделать высококачественные световоды большой длины можно только на хорошей технике. Ему удалось договориться с академиком Б.В.Бункиным (руководителем ЦКБ «Алмаз») о разработке специального станка для изготовления заготовок в Институте химии. Мы, в свою очередь, обязались делать для ЦКБ «Алмаз» световоды в соответствии с их техническим заданием, что и выполнили впоследствии. Вытяжную установку мы решили сконструировать самостоятельно, используя для нагрева заготовок  $\text{CO}_2$ -лазеры, которые, судя по зарубежным публикациям, обеспечивали на тот момент хорошую стабильность диаметра и наиболее высокую прочность световодов. Проблема была, где эту вытяжную установку поставить, поскольку ее высота планировалась в 10 м. По-видимому, думая об этом, Александр Михайлович увидел из окна своего кабинета высокую башню расположенную рядом Института общей генетики АН СССР. Она подходила нам для размещения вытяжной установки, и Александр Михайлович договорился с дирекцией соседнего института о передаче нам этой башни во временное пользование.

Была еще одна проблема, которая сильно волновала Александра Михайловича, — проведение широких фундаментальных исследований стеклянных волоконных световодов. Уже стало ясно, что разработки могут найти широкое и разнообразное применение. В связи с этим возникало много вопросов, на которые пока не существовало четких ответов. В первую очередь необходимо было понять, каковы предельные значения оптических потерь и механической прочности волоконных световодов. Поскольку их предполагалось использовать для связи на больших расстояниях, следовало определить влияние дисперсии и оптической нелинейности стекла на пе-



Н.Х.Аглиулов и Г.Г.Девярых у ректификационной колонны.

редачу информации, а также зависимость указанных параметров от состава стекла и многие другие характеристики. Хотя в ряде зарубежных университетов и фирм уже начали проводить соответствующие исследования, Прохоров был убежден, что ими надо заниматься и у нас. Какими силами? Несмотря на ограниченные возможности штатного расписания академического института,



В.А.Богатырев налаживает установку для вытяжки волоконных световодов.

Александр Михайлович решил создать сектор волоконной оптики.

В 1975 г. высококачественные волоконные световоды на основе кварцевого стекла из синтезированных в ИХАН высокочистых летучих галидов кремния и бора уже стабильно выпускались, и благодаря огромному авторитету Прохорова деятельность по созданию световодов с низкими оптическими потерями с помощью технологии газофазного осаждения летучих соединений получила в СССР мощный импульс. Большую роль в этом плане сыграла организация по инициативе Александра Михайловича Всесоюзной конференции «Волоконно-оптические линии связи». Первая такая конференция состоялась в апреле 1976 г., а затем они проводились каждые два-три года, и в организации каждой Прохоров принимал самое активное участие.

В 1977 г., к 60-летию Октябрьской революции, в Зеленограде совместно с промышленными предприятиями была успешно запущена первая экспериментальная волоконно-оптическая телефонная система связи на наших световодах с низкими оптическими потерями.

В последующие годы многие организации были вовлечены в решение проблемы создания эффективных волоконных световодов. Особенно большую активность проявило Министерство электронной промышленности (МЭП). Научно-исследовательскому институту электровакуумного стекла (НИИЭС, директор В.М.Фирсов) было поручено

заниматься технологией волоконных световодов, другим организациям министерства — конструированием и изготовлением технологического оборудования и контрольно-измерительных приборов. Уже в 1979 г. мы внедрили в НИИЭС разработанную нами технологию кварцевых волоконных световодов с затуханием менее 10 дБ/км и в течение последующих лет передавали туда наши новые разработки в этой области.

### Восьмидесятые: успехи и препятствия

В 1980 г. в США была введена в эксплуатацию первая коммерческая волоконно-оптическая система связи. Началось бурное развитие мировой оптической связи. Его лучшей демонстрацией стала прокладка и успешный запуск в 1988 г. подводной Трансатлантической системы, соединившей Европу и США.

80-е годы были очень успешными (а может быть, и лучшими) в проведении фундаментальных и прикладных исследований в области волоконной оптики в институтах АН СССР (ФИАН/ИОФАН, ИХАН/ИХВВ и ИРЭ). В значительной степени это было связано с активной поддержкой работ тогда уже директором ИОФАН академиком Прохоровым и директором ИРЭ академиком В.А.Котельниковым. Александр Михайлович все эти годы продолжал уделять волоконной оптике большое внимание. Сектор волоконной оптики он образовал еще

в ФИАН в 1980 г., а в ИОФАН — сначала лабораторию волоконной оптики (1983), а затем и отдел (1985). В 1988 г. для отдела был построен лабораторный корпус площадью ~5000 м<sup>2</sup>, и широкие исследования по нелинейной волоконной оптике начались. В частности, было проведено исчерпывающее теоретическое и экспериментальное изучение формирования и распространения оптических солитонов в волоконных световодах с учетом влияния оптических потерь, а также закона изменения дисперсии и частотного спектра входного сигнала [3]. Результаты этих работ имели и практическое значение, так как тогда в литературе широко обсуждалась возможность использовать оптические солитоны для передачи информации по волоконным световодам. Помимо фундаментальных исследований Александр Михайлович обдумывал новые применения созданных световодов, искал пу-



С них начиналась волоконная оптика в ФИАН СССР (1976). Слева направо: сидят — Н.П.Щеглова, А.М.Прохоров, Е.М.Дианов; стоят — А.В.Николайчик, Н.Н.Клушин, А.Н.Шеманков, А.В.Чиколини, Ю.А.Лукашев, А.В.Белов, Е.П.Никитин, М.М.Бубнов.

ти и партнеров для их реализации. В 1983 г. мы разработали технологию изготовления градиентных волоконных световодов с полосой пропускания не менее 500 МГц/км и малыми оптическими потерями [4]. Более 50 км таких световодов было поставлено в ОКБ кабельной промышленности для выпуска оптического кабеля. Наконец, в мае 1984 г. в Москве была введена в опытную эксплуатацию первая волоконно-оптическая линия кабельного телевидения длиной около 10 км, которая подвела телевизионный сигнал к жилому дому на Уральской улице, находящемуся в зоне неуверенного приема. Я был свидетелем большой радости его жильцов. Мне запомнилась реакция мужчин, которые говорили, что теперь смогут смотреть футбольные матчи. Позже еще несколько подобных волоконных линий были проложены в Москве, Ленинграде и Горьком.

Другим интересным и важным приложением, которое нашел Александр Михайлович, было создание управляемых по волоконному световоду протитанковых реактивных снарядов. Такими снарядами занималось КБ машиностроения (КБМ, Коломна), возглавляемое С.П.Непобедимым. Наша задача состояла в разработке и изготовлении достаточно длинных (~10 км) высокопрочных волоконных световодов с предельно низкими оптическими потерями. Сергей Павлович приехал в ИОФАН и вместе с Александром Михайловичем пришел посмотреть, как мы вытягиваем волоконные световоды, и обсудить технические требования к ним. Непобедимый подробно интересовался технологией волоконных световодов и под конец спросил, какие у нас есть проблемы с их изготовлением. Когда мы сказали ему об отсутствии у нас высокоточных станков для заготовок, он, уточнив требования к станкам, пообещал изготовить для нас несколько штук. Свое обещание он выполнил, и мы в течение многих лет использовали эти станки для производства заготовок. Мы тоже выполнили поручение Непобедимого: проведя подробные исследования механизмов, ответственных за деградацию механической прочности волоконных световодов, и внося соответствующие изменения в технологию, изготовили световоды на уровне лучших мировых образцов с прочностью ~5 ГПа. Однако эта прочность уступала теоретической для кварцевого стекла, составляющей, по разным оценкам, 12–20 ГПа. Нанося в процессе вытяжки герметичное металлическое покрытие, мы смогли впервые в мире повысить прочность световодов в два-три раза [5]. Надо подчер-



С.П.Непобедимый — генеральный конструктор Конструкторского бюро машиностроения (Коломна).

нуть, что нанесение такого покрытия на волокно во время его вытяжки — задача очень непростая. Испытания наших световодов на прочность в КБМ прошли успешно, но после 1991 г. работы там были прекращены.

Тогда же в академических институтах был достигнут большой прогресс в технологии волоконных световодов, в частности, разработаны одномодовые световоды с оптическими потерями у теоретического предела на длинах волн 1,3 мкм (0,37 дБ/км) и 1,55 мкм (0,21 дБ/км). Впечатляющие успехи в создании волоконно-оптических систем связи в мире и отечественные результаты мирового уровня в технологии и изучении световодов, несомненно, способствовали принятию важных решений

Правительством СССР по развитию в стране такой связи. В 80-х годах были выделены достаточно большие средства для поддержки фундаментальных исследований и организации промышленного производства волоконных световодов. В 1981 г. принято Постановление ЦК КПСС и СМ СССР «О разработке и внедрении световодных систем связи и передачи информации». Главным министерством определили Министерство промышленности средств связи (МПСС). Министр МПСС Э.К.Первышин возглавил созданный Межведомственный координационный совет. По указанию председателя ВПК Л.В.Смирнова в 1983 г. была сформирована Комиссия по качеству всех звеньев технологической цепочки изготовления световодных кабелей (исходные материалы—заготовка—волокно—световодный кабель), ценообразованию и путям снижения цен на световоды и кабель из них. Для различных ступеней этой технологической цепочки образовали четыре рабочих группы. Комиссия состояла из 27 человек, представляющих семь министерств и АН СССР. Председателем комиссии назначили И.Б.Пешкова из Министерства электротехнической промышленности (МЭТП), а от Академии в комиссию вошли А.Н.Гурьянов (ИХАН), М.Е.Жаботинский (ИРЭ) и я (ИОФАН).

Было также принято и весьма спорное решение: разделить технологию изготовления волоконных световодов между двумя министерствами. Делать заготовки поручили Министерству промышленности строительных материалов (МПСМ), а конкретно — Заводу технического стекла и Стекольному заводу имени Ф.Э.Дзержинского в Гусь-Хрустальном и НПО «Кварц» в Ленинграде. Вытяжку волоконных световодов отдали в МЭТП. Мы считали, что дробить процесс между разными производителями неправильно (Прохоров был

с нами согласен). И тем более неразумно доверить разработку технологии и изготовление заготовок строительному ведомству, так как технология эта очень сложная, требующая от исполнителей знания физики, химии и механики (в чем мы убедились), а также культуры работы с особо чистыми веществами.

В результате была создана многоуровневая структура управления промышленным производством волоконных световодов и оптических кабелей, представляющая различные министерства, которая оказалась малоэффективной. Поэтому для координации работ был создан еще один орган — Межведомственный научно-технический комплекс (МНТК) «Световод», председателем которого стал Пешков, а научным руководителем — Прохоров. Увы, реальных рычагов влияния на предприятия различных министерств МНТК «Световод» не имел.

Чтобы обеспечить развитие производственных мощностей по выпуску кварцевых заготовок, постановлениями Совета министров СССР 1985 и 1986 гг. были предусмотрены, в частности, работы по созданию специального технологического оборудования для производства опорных труб, оптических заготовок и контрольно-измерительной аппаратуры, а также освоение на Стекольном заводе имени Ф.Э.Дзержинского оборудования по выпуску кварцевых заготовок, закупленного за рубежом. Но к 1990 г. намеченные планы в полной мере выполнены не были, в частности, импортная техника так и не была запущена. Промышленное производство волоконных световодов, организованное к концу 80-х годов на нескольких предприятиях, не могло обеспечить высокое качество и удовлетворительный выход годных изделий. Поэтому Министерство связи сделало ставку на зарубежную продукцию. А в России правительство вообще перестало заниматься этой проблемой...

Итак, очень серьезное внимание различных государственных органов, значительное финансирование, большое число организаций разных министерств, привлеченных к созданию волоконно-оптической связи, в 80-х годах не привели к организации промышленного производства волоконных световодов в СССР. На мой взгляд, у этой неудачи несколько причин.

1. Создать промышленное производство световодов было способно МЭП, обладавшее наиболее высоким научно-техническим потенциалом. В конце 70-х и начале 80-х годов оно начало очень успешно решать эту проблему, но по каким-то причинам не стало головным министерством.

2. Проблему «размазали» по нескольким министерствам, что сильно затруднило контроль и управление процессом. Самой большой ошибкой было поручить проблему создания кварцевых заготовок МПСМ.

3. Не была найдена форма привлечения академических институтов. Прохоров считал необхо-

димым создать Научно-технический совет из ученых и ведущих специалистов в этом направлении, который должен был бы вырабатывать научно-техническую политику в области волоконно-оптической связи и пропускать через себя все крупные государственные проекты. Однако здесь к мнению Прохорова не прислушались.

4. Указанные выше причины затрудняли и замедляли организацию промышленного производства волоконных световодов, но переход к рыночной экономике вообще остановил этот процесс, который мог бы все-таки успешно завершиться.

## Девяностые: время застоя

Итак, в 90-х годах становление промышленного производства волоконных световодов в стране практически прекратилось. Попытки руководства Академии наук и лично Александра Михайловича оживить интерес государственных органов к этой проблеме успеха не принесли.

А в развитии мировой волоконно-оптической связи произошли в эти годы исключительно важные качественные изменения. Во-первых, были разработаны (и стали широко использоваться в системах связи) эрбиевые и рамановские волоконные усилители. Принципиально, что полоса усиления первых совпадает с областью минимальных оптических потерь волоконных световодов (1.53–1.57 мкм), а вторые могут работать на любой длине волны (большой вклад в их разработку внесли сотрудники отдела волоконной оптики ИОФАН). Во-вторых, в системах связи стала применяться технология спектрального уплотнения каналов, позволяющая передавать по одному волоконному световоду ~100 независимых каналов на различных длинах волн в пределах полосы усиления волоконного усилителя. В результате были созданы системы со скоростью передачи информации по одному волоконному световоду ~1 Тбит/с [6].

Александр Михайлович очень живо воспринимал эти результаты, он осознавал реальную возможность создать в ближайшем будущем еще более скоростные волоконно-оптические системы (до десятков терабит в секунду) и понимал значение информации для экономики, образования, науки и обороны развитых стран. Он считал очень важным развивать это направление в нашей стране, и мы неоднократно обсуждали необходимость разрабатывать новые волоконные световоды и проводить более широкие исследования явлений, сопровождающих распространение лазерного излучения по световоду.

И научная работа не останавливалась. В этот период совместно с ИХВВ РАН мы создали ряд новых волоконных световодов: с изменяющейся по длине дисперсией, фоточувствительные, легированные азотом и состоящие из трех наиболее рас-



пространенных в природе элементов (Si, O, N), с высокой оптической нелинейностью для эффективных рамановских волоконных лазеров и оптических усилителей [7]. При исследовании оптических явлений в волоконных световодах, таких как вынужденное комбинационное рассеяние, генерация второй гармоники, четырехфотонное параметрическое взаимодействие, оптический разряд, были получены результаты мирового уровня. Однако выполнять эти работы из-за резкого сокращения финансирования науки было очень трудно, и Александр Михайлович постоянно искал возможности их финансовой поддержки.

Чрезвычайно важным для нас решением Прохорова оказалось создание в 1990 г. научного журнала «Soviet Lightwave Communications», который стал выпускаться Академией наук сразу на английском языке совместно с издательством «Institute of Physics Publishing» (Бристоль, Великобритания) и широко распространялся в мире. Александр Михайлович считал, что журнал существенно ускорит публикацию работ отечественных ученых по волоконной оптике и смежным проблемам и тем самым послужит пропаганде их фундаментальных достижений. Это было очень важно в условиях быстрого развития волоконно-оптической связи в мире. Кроме того, журнал служил тогда для нас единственным источником валюты. Деньги от журнала (10 000 фунтов в год) позволяли посещать конференции и не оказаться оторванными от мировой науки в трудные для страны годы.

Другая форма финансирования наших исследований — контракты с зарубежными фирмами, которые стали возможны в новой России. Высокий научный уровень работ по волоконной оптике в команде ИОФАН—ИХВВ вызывал большой интерес и желание сотрудничать с нами у фирм в США, Канаде, Корее, Японии и других странах. Первый контракт между всемирно известной телекоммуникационной фирмой «AT&T Bell Labs» и отделом волоконной оптики ИОФАН был заключен в 1992 г. Его подписали А.М.Прохоров и К.Пател, изобретатель ряда лазеров, включая CO<sub>2</sub>-лазер. Позже были заключены и другие соглашения, в частности с фирмой «Corning Glass», которая остается главным производителем волоконных световодов в мире. Финансовая поддержка от этих контрактов и тесное взаимодействие с зарубежными коллегами позволяли нам сохранить высокий уровень работ по волоконной оптике в тяжелое для российской науки время.

Но самое важное решение Александра Михайловича — образовать в качестве самостоятельной научной организации в 1993 г. на базе отдела волоконной оптики соответствующий научный центр (НЦВО РАН). Центр получил построенный ранее лабораторный корпус со всем оборудованием и всех (около 100) сотрудников отдела. Александр Михайлович считал, что в тех услови-

ях, которые сложились в России, это будет способствовать более успешному развитию волоконной оптики. Такое решение Александра Михайловича не означало, конечно, что он потерял интерес к предмету, мы по-прежнему часто обсуждали как научные, так и организационные вопросы.

## Двухтысячные: второй заход

На заре третьего тысячелетия в мировой волоконно-оптической связи были достигнуты новые успехи, прежде всего в увеличении скорости передачи информации по одному волоконному световоду. Напомню, что к 2010 г. максимальная скорость в коммерческих системах связи составила величину 10 Тбит/с, а в экспериментах — до 100 Тбит/с; к 2015 г. в мире было проложено 2 млрд км волоконных световодов. Если сохранится сегодняшний рост потребности в информации (30–40% в год), понадобится передавать данные со скоростью 1 Пбит/с [8]. Однако для стеклянных волоконных световодов это невозможно из-за ограничений, связанных с такими параметрами среды, как нелинейность, дисперсия, оптические потери.

Сейчас ведутся интенсивные исследования нового поколения волоконных световодов, использование которых позволяет в принципе решить проблему передачи информации с петабитными скоростями. К ним относятся световоды с воздушной сердцевиной, многосердцевидные и новые активные световоды, легированные висмутом. Последние перспективны для создания волоконных лазеров и оптических усилителей в спектральных областях 1300–1500 и 1600–1700 нм. Эти диапазоны особенно привлекательны, так как здесь телекоммуникационные световоды имеют низкие оптические потери (<0.35 дБ/км). Пока в высокоскоростных системах оптической связи используется очень узкая спектральная область 1530–1610 нм, определяемая полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. Расширение спектральной области для передачи информации — один из путей увеличения ее скорости. В 2005 г. впервые в мире НЦВО совместно с ИХВВ изготовили волоконные световоды, легированные висмутом [9]. К настоящему моменту мы разработали для указанных спектральных областей висмутовые волоконные лазеры и оптические усилители, которые могут найти широкое применение в системах связи следующего поколения, а также в медицине и в сенсорных устройствах.

Упомянутые выше уже достигнутые и намечающиеся мировые рубежи в передаче информации вновь поставили вопрос о промышленном производстве волоконных световодов в России.

Первым проявил инициативу глава Республики Мордовия Н.И.Меркушкин. Он учредил фирму, чтобы организовать промышленный выпуск во-

локонных световодов в Мордовии, пригласил Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности (ВНИИКП) для участия в этом проекте и меня в качестве консультанта. Было закуплено технологическое оборудование для производства волоконных световодов, причем производство заготовок планировалось на Стекольном заводе в Гусь-Хрустальном, а вытяжка волоконных световодов — в Саранске. Государственные организации, в частности Министерство связи, участия в инициативе не принимали.

По разным причинам, которые я не хочу здесь обсуждать, воплотить в жизнь планы не удалось. Но намерение организовать промышленное производство волоконных световодов у энтузиастов не пропало. Многолетние усилия руководства Мордовии, ВНИИКП, НЦВО РАН, Газпромбанка, Роснано и других организаций привели к запуску нового проекта по организации промышленного производства волоконных световодов в республике. Строительство завода тоже происходило не гладко, но в конце концов в 2015 г. завод заработал. На его открытии присутствовал заместитель Председателя Правительства РФ А.В.Дворкович. На заводе началась вытяжка волоконных световодов из (пока еще) зарубежных заготовок с объемом производства 2,5 млн км в год. Но планируется и строительство второй очереди — по производству самих заготовок. Хочется верить, что руководство страны осознано важность создания собственных волоконно-оптических технологий для страны.

## Возвращаясь к главному

Какова же роль Александра Михайловича Прохорова в развитии волоконной оптики — этого важнейшего направления современной науки и техники? Несмотря на неудачу в организации промышленного производства волоконных световодов в стране, связанную главным образом с известными

ми политико-экономическими потрясениями, результаты его деятельности в данной области трудно переоценить. Перечислю основные составляющие его вклада.

— Изготовление в СССР по замыслу и при непосредственном участии Прохорова стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями продемонстрировало, что мы способны создать соответствующую технологию на основе отечественных разработок и исходных материалов.

— Широкие фундаментальные исследования волоконных световодов, инициированные и поддержанные Прохоровым и приведшие к получению целого ряда результатов мирового уровня, способствовали развитию волоконной оптики, что признано мировым научным сообществом.

— Организация всесоюзных конференций по волоконной оптике и совместная работа в течение почти 30 лет с различными институтами и предприятиями пропагандировали перспективы волоконной оптики и помогали осваивать новую область современной техники.

— Создание Научного центра волоконной оптики породило одного из мировых лидеров данного направления (по оценке мирового научного сообщества). Сегодня НЦВО РАН по-прежнему проводит широкие фундаментальные и прикладные исследования по волоконной оптике, осуществляет научное руководство/сопровождение практически всех проектов по этой тематике в России, готовит научные кадры, участвует в организации двух всероссийских конференций (в Перми и Саранске).

Можно сказать, что идеи Прохорова по развитию волоконной оптики в России в конце концов частично воплотились в строительстве завода по изготовлению волоконных световодов в Саранске. Остается только сожалеть, что он был запущен лишь через 40 лет (!) после изготовления в стране первых волоконных световодов с низкими оптическими потерями. ■

## Литература

1. Девятых Г.Г., Дианов Е.М. Волоконные световоды с малыми оптическими потерями // Вестник АН СССР. 1981. Т.51. Вып.10. С.54–66.
2. Белов А.В., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н. и др. Волоконный световод с малыми потерями с сердцевиной из кварцевого стекла и с боросиликатной оболочкой // Письма в ЖТФ. 1975. Т.1. Вып.15. С.689–692.
3. Дианов Е.М., Мамышев П.В., Прохоров А.М. Нелинейная волоконная оптика // Квантовая электроника. 1988. Т.15. №1. С.5–29.
4. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика // УФН. 1986. Т.148. Вып.2. С.289–311.
5. Богатырев В.А., Бубнов М.М., Дианов Е.М. и др. Высокопрочные световоды в герметичном покрытии // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. Вып.9. С.769–773.
6. Дианов Е.М. На пороге Тера-эры // Квантовая электроника. 2000. Т.30. №8. С.659–663.
7. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. 2004. Т.174. Вып.10. С.1139–1142.
8. Дианов Е.М. На пороге пета-эры // УФН. 2013. Т.183. Вып.5. С.511–518.
9. Дианов Е.М. Легированные висмутом волоконные световоды — новый прорыв в лазерных средах для ближней ИК-области спектра // Квантовая электроника. 2012. Т.42. №9. С.754–761.

# Фотоэлектронная «луна времени»

М.Я.Щелев

Окружающий мир наполнен сверхкороткими событиями, отдельные фазы которых невооруженный человеческий глаз не способен воспринимать в виде отчетливых изображений. Наши глаза при их уникальной чувствительности (замечают вспышку, состоящую из нескольких десятков квантов!) не могут видеть процессы в динамике с временным разрешением лучше, чем  $10^{-1}$  с (такова инерционность сетчатки). Иначе говоря, сфокусированные на сетчатке изображения быстропротекающих процессов (БПП) «замазываются» во временном интервале, составляющем десятую долю секунды, а мозг, анализируя эту интегральную картину, не различает ее мгновенных фаз. Вот почему несколько поколений энтузиастов посвятили себя созданию и применению инструментов для визуализации изображений БПП — от первых оптико-механических камер с регистрацией на фотоэмульсии до приборов с зарядовой связью и электронно-оптических регистраторов, временное разрешение которых сегодня приближается к сотне фемтосекунд ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ).

## Долгая дорога

Специалисты по регистрации изображений БПП признают пионерами высокоскоростной фо-



*Михаил Яковлевич Щелев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом фотоэлектроники ИОФ РАН, член Экспертного совета по физике ВАК. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Ленинского комсомола, Госпремии СССР, премии им.А.Г.Столетова РАН, награжден золотыми медалями научных обществ Германии, США, Японии. Более полувека разрабатывает пико-фемтосекундную электронно-оптическую технику.*

**Ключевые слова:** пико-фемто-атто-фотоэлектроника.  
**Key words:** pico-femto-atto-photoelectronics.

тографии выдающегося британского фотографа-профессионала Э.Майбриджа (1830–1904) и известного французского ученого-физиолога Э.Мари (1830–1904) [1]. В свое время калифорнийский губернатор Л.Стенфорд, большой любитель игры в тотализатор на лошадиных скачках, решил во чтобы то ни стало выиграть разгоревшийся среди знати спор о том, отрываются ли у лошадей от земли все четыре копыта при переходе от рыси в галоп. Для этого в 1872 г. в Америку был специально приглашен Майбридж. Полученные на построенной им электрооптической камере изображения (рис.1,а) доказали, что в определенные моменты времени, исчисляемые сотыми долями секунды, галопирующая лошадь действительно «летела» в воздухе, прижав к себе все четыре ноги. А Мари в 1882 г. с помощью изобретенного им «электрофотографического ружья» (рис.1,б) зафиксировал мгновенные фазы полета пеликанов (рис.1,в). Так еще в XIX в. зародились методы и средства для фотографической регистрации сверхкоротких мгновений, недоступных для прямого человеческого распознавания.

Последующее столетие характеризовалось бурным развитием и повсеместным применением для регистрации БПП оптико-механической высокоскоростной фотографии. Отечественная научная школа под руководством профессора А.С.Дубовика внесла весомый вклад в развитие этой области технической физики и научного приборостроения [2]. В камерах с оптико-механической коммутацией изображений последние фокусируются на светочувствитель-

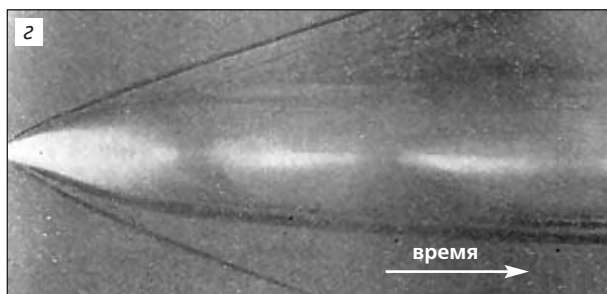
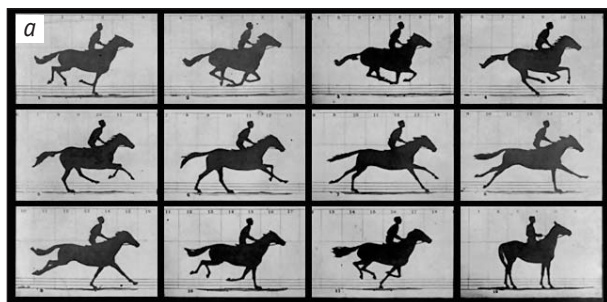


Рис.1. Первые высокоскоростные фотографии. Изображения последовательных фаз движения галопирующей лошади (а), полученные Э.Майбриджем с помощью его аппарата «зоо-праксископ» (zoopraxiscope). «Электрофотографическое ружье» Э.Мари (б) и сделанная им покадровая съемка летящих в небе пеликанов (в). Время экспозиции каждого отдельного кадра 1/720 с. Распространение ударной волны от периодического электрического разряда в воздухе, которое было зафиксировано высокоскоростным фоторегистратором СФР (z), разработанным и изготовленным под руководством А.С.Дубовика в Институте химической физики АН СССР.

ном носителе (как правило, на фотографической эмульсии). Если изображение форматируется как двумерное, осуществляется так называемое покадровое фотографирование; если же оно одномерно (например, ограничено узкой щелью), реали-

зуется щелевая («стрик») развертка. Во втором случае обеспечивается максимальное временное разрешение, приближающееся к 1 нс и в конечном счете лимитируемое предельной механической прочностью перемещающихся компонентов. Такая фотография стала особенно востребованной в 40-х годах прошлого века, когда после окончания Второй мировой войны при создании атомно-водородного оружия нужно было получать изображения последовательных фаз взрывного процесса. Знаменитые отечественные фоторегистраторы СФР-2МТ с турбинным приводом, вращающим зеркала со скоростью до 240 тыс. об./мин., обеспечили частоту покадровой съемки  $8 \cdot 10^6$  кадр/с, а максимальное временное разрешение в режиме щелевой развертки составило  $3 \cdot 10^{-9}$  с (рис.1,з).

В конце тех же 40-х годов к решению атомной проблемы как у нас, так и за рубежом были привлечены ведущие научные школы. Именно тогда ученые Курчатовского института обогатили человечество электронно-оптической хронографией [3], которая, по сделанным ими теоретическим оценкам, могла обеспечить регистрацию БПП с предельным временным разрешением вплоть до 10 фс. Созданные в эти годы под руководством Е.К.Завойского и М.М.Бутслова первые в мире времяанализирующие электронно-оптические преобразователи (ЭОП) типа ПИМ-3 (рис.2,а) были оптически сочленены с пятикаскадными усилителями яркости изображения с магнитной фокусировкой (УМИ-95, рис.2,б). Это позволило впервые в мире осуществить развертку свечения миниатюрных искровых разрядов с временным разрешением лучше 10 пс при чувствительности, достаточной для регистрации каждого единичного фотоэлектрона, который покидал входной фотокатод (рис.2,в).

Прошло несколько лет, наступили 60-е — годы лазерного бума, и понадобилось фотографически визуализировать отдельные фазы быстропротекающих оптических процессов, связанных с функционированием лазеров и взаимодействием лазерного излучения с веществом. Академики А.М.Прохоров и Н.Г.Басов в Физическом институте АН СССР (ФИАН) оценили перспективность применения времяанализирующих ЭОП и с энтузиазмом подхватили эстафету этого уникального технического направления. В ФИАН были организованы систематические лазерные исследования с применением электронно-оптической аппаратуры, разрабатываемой в Курчатовском институте, в НИИ прикладной физики (НИИПФ) и ВНИИ оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) при участии М.М.Бутслова, Б.М.Степанова, С.Д.Фанченко и их сотрудников. А к началу 80-х Александр Михайлович, обладая незаурядным талантом научного предвидения и строго следуя идее единства прикладной и фундаментальной науки, инициировал сначала в ФИАН, а затем в Институте общей физики (ИОФ РАН) создание собственных экспе-

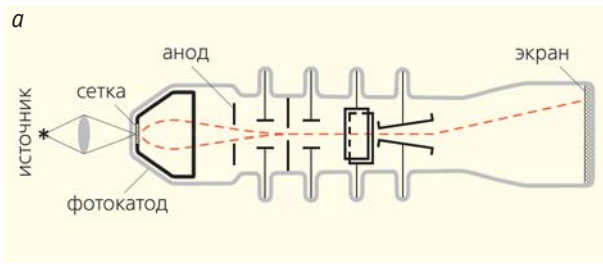
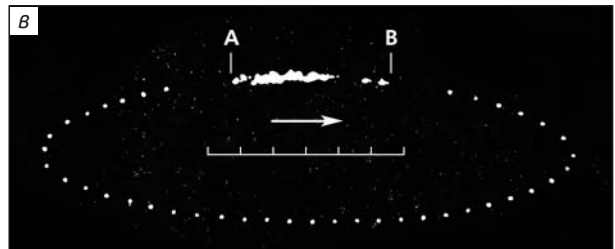


Рис.2. Устройство первого в мире времяанализирующего ЭОП отечественного производства типа ПИМ-3 (а) и сам прибор (б), оптически сочлененный с пятикаскадным усилителем яркости с магнитной фокусировкой изображения (УМИ-95). Временная развертка свечения миниатюрной искры (СВЧ-разряда в вакууме, в). Стрелка указывает направление развертки. Одно деление шкалы  $1 \cdot 10^{-10}$  с. Светлые точки показывают форму развертки изображения на экране ЭОП. А — начало и В — конец свечения искры.



риментальных образцов ЭОП и электронно-оптических камер (ЭОК), ориентированных на лазерные применения.

### Фотоэлектроны фотографируют

Фундамент фотоэлектроники был заложен немецким ученым Г.Герцем, который в 1887 г. открыл явление внешнего фотоэффекта. Цикл работ по его всестороннему изучению количественными методами провел в 1888–1890 гг. А.Г.Столетов. Ему принадлежит открытие первого закона внешнего фотоэффекта (прямо пропорциональная зависимость фототока от интенсивности падающего на фотокатод света в пределах шести порядков величины), измерение инерционности фотоэффекта, составившее тогда  $\approx 10^{-3}$  с, наблюдение фотоэлектрического утомления (снижение чувствительности фотоэлемента со временем) и т.п. Именно Столетов создал первый в мире фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте.

А первый в мире электронно-оптический преобразователь был построен в начале 30-х годов прошлого столетия усилиями Г.Холста, Дж. де Бура, П.Фарнсворта, В.Зворыкина и др. [4]. Оптическое изображение проецировалось на фотокатод, трансформировалось в фотоэлектронный аналог и в ускоряющем электрическом поле плоскопараллельно переносилось в плоскость катодолюминесцентного экрана, где производилось обратное преобразование фотоэлектронного изображения в видимое. Накануне Второй мировой войны ЭОП приобрели популярность в качестве приборов ночного видения. По сравнению с исходным «стаканом Холста» за счет использования фокусирующих электромагнитных полей удалось существенно улучшить пространственное разрешение этих приборов (вплоть до многих десятков пар линий на миллиметр). В разработку фокусирующих сис-

тем для электростатических ЭОП большой вклад внесли ученые многих стран, но особое место здесь принадлежит академику Л.А.Арцимовичу.

К концу 40-х годов относятся первые попытки приспособить приборы ночного видения для регистрации БПП. М.П.Ванюков в Государственном оптическом институте (ГОИ) сделал камеру для покадровой съемки БПП с миллисекундными экспозициями, используя импульсную коммутацию ускоряющего напряжения на ЭОП. В Англии в 1949 г. Дж.Коуртни-Пратт [5] с помощью магнитного поля впервые реализовал развертку одномерных фотоэлектронных изображений (ограниченных узкой щелью на входном фотокатод) с наносекундным временным разрешением. А уже в 1952 г. Завойский с сотрудниками на многокаскадных, созданных М.М.Бутсловым ЭОП типа ПИМ-УМИ построили детектор ядерных частиц — люминесцентную камеру.

Столь пристальный интерес к времяанализирующим ЭОП диктовался уникальной совокупностью их характеристик. Так, эти приборы способны одновременно фиксировать картину БПП объемом до  $10^3$ – $10^8$  пространственно разрешаемых элементов размерами 10–30 мкм в спектральном диапазоне от мягкого рентгена (единицы нанометров) до ближней ИК-области (1600 нм) и даже до 3 мкм (в режиме многофотонного фотоэффекта). Квантовая эффективность некоторых фотоэмиттеров в отдельных областях спектра может достигать десятков процентов. Будучи сочлененными с усилителями яркости изображений (многокаскадные ЭОП, усилители яркости на микроканальных пластинах, электронно-чувствительные ПЗС-матрицы и т.п.), времяанализирующие ЭОП надежно регистрируют одиночные фотоэлектроны, покидающие входной фотокатод. Их динамический диапазон регистрации по интенсивности может достигать величины  $10^3$ – $10^6$ . Быстродействие фотоэффекта (по оценкам — единицы фемтосекунд)

плюс безынерционность взаимодействия быстроменяющегося коммутирующего электрического поля с фотоэлектронным пучком позволяют отклонять фотоэлектронные изображения (ограниченные, например, щелью или точкой) по выходному экрану ЭОП с фазовыми скоростями, которые во много раз превышают скорость света. Легко показать, что для пространственного элемента размером  $10^{-2}$  см, надежно разрешаемого при фазовой скорости развертки фотоэлектронного изображения по экрану ЭОП в  $10^{11}$  см/с (три скорости света), временное разрешение приближается к сотне фемтосекунд. А поскольку в современных пико-фемтосекундных ЭОП используются специализированные полупрозрачные кислородно-серебряно-цезиевые фотокатоды толщиной 200–300 Å, где фотоэмиссия происходит в поверхностном слое, оптическое изображение и его фотоэлектронный аналог оказываются практически совместимыми, что обеспечивает и высокое пространственное разрешение регистрируемых изображений. Наконец, если к перечисленным достоинствам времяанализирующих ЭОП добавить их высокую компьютерную совместимость, перспективы их применения в экспериментальной физике становятся поистине захватывающими.

Итоги полувекового развития пико-фемтосекундной электронно-оптической хронографии подвел Фанченко в своей пленарной лекции «Уроки фемтосекундной фотографии» на 23-м Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии и фотонике (Москва, 1998). Заключительные слова звучали так: «В начале 70-х Прохоров организовал разработку и испытание пико-фемтосекундных ЭОП, снабженных ускоряющей сеткой, в тесном сотрудничестве с учеными из ВНИИОФИ — М.М.Бутсловым, Б.М.Степановым, Г.И.Брюхневичем и др. В 1989 г. он создал в ИОФ РАН отдел фотоэлектроники на базе образованной в 1983 г. лаборатории пикосекундной фотоники. В этот отдел он пригласил ведущих специалистов из ВНИИОФИ. По сей день в ИОФ РАН функционирует исследовательско-технологическая цепочка по математическому моделированию, конструированию, технологическому сопровождению, изготовлению и испытанию на фемтосекундных лазерных стендах экспериментальных образцов ЭОП, фотоэлектронных пушек и камер на их основе. Прохоров внес основополагающий вклад в становление и широкое развитие международного сотрудничества в области высокоскоростной фотографии и фотоники».

### В погоне за временным разрешением

Итак, один из самых привлекательных параметров времяанализирующих ЭОП при регистрации изображений БПП — их временное разрешение, предел которого в 10 фс установили в 1954 г. основоположники пико-фемтосекундной хроногра-

фии. Тщательно рассмотрев всю цепочку преобразования информации от момента проецирования изображения БПП на фотокатод ЭОП и до съема проанализированной во времени эопограммы с катодолюминесцентного экрана, Завойский и Фанченко выявили целый ряд причин, ограничивающих временное разрешение. Физические неустраиваемыми они назвали хроматические aberrации первого порядка в фотоэлектронных изображениях, которые определялись разбросом начальных энергий электронов, покидающих фотокатод. Выведенное ими соотношение для оценки временного разрешения за счет вклада хроматических aberrаций ( $\tau \sim 10^{-11}/E$ , где  $E$  — напряженность поля у фотокатода в электростатических единицах) стало классическим! Компенсировать этот разброс предлагалось только за счет повышения импульсной напряженности прикатодного электрического поля (вплоть до десятков и даже сотен киловольт на миллиметр).

В начале нового тысячелетия в отделе фотоэлектроники были предприняты отчаянные попытки повысить импульсную напряженность поля у фотокатодов ЭОП типа ПВ-ФС-М, разработанных и изготовленных в ИОФ РАН (рис.3,а). Тогда удалось поднять временное разрешение вплоть до 200 фс (рис.3,б), о чем в январе 2002 г. было

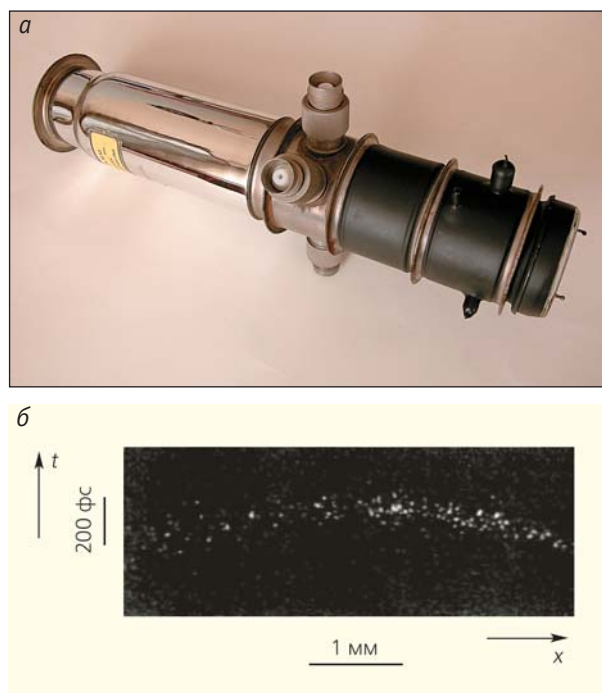


Рис.3. Общий вид ЭОП типа ПВ-ФС-М, разработанных в ИОФ РАН и обеспечивающих импульсную напряженность электрического поля у фотокатода вплоть до  $\geq 30$  кВ/мм (а). Типичная фотография входного 160-фемтосекундного лазерного импульса, полученная с экрана ЭОП типа ПВ-ФС-М (б). Скорость развертки  $5 \cdot 10^{10}$  см/с. Напряженность электрического поля у фотокатода 13 кВ/мм.

направлено сообщение в «Квантовую электронику» [6]. Оно оказалось нашей последней совместной с Прохоровым (из 193) статьей, а его фамилия была помещена в траурную рамку.

Эти прорывные эксперименты, выполненные при активной поддержке Александра Михайловича, показали, как тернист и труден путь для достижения 10-фемтосекундного временного разрешения ЭОП. Ведь, согласно формуле Завойского—Фанченко, наше временное разрешение должно было быть на порядок лучше — около 25 фс (импульсная напряженность электрического поля у фотокатода составляла  $\sim 400$  CGSE заряда). Неожиданно возникший барьер заставил нас сильно поволноваться: почему же экспериментальное разрешение «застряло» на отметке в двести фемтосекунд? Прежде всего мы задумались о длительности акта фотоэмиссии для формируемых в наших ЭОП низкоомных (поверхностное сопротивление — единицы Ом на квадрат) кислородо-серебряно-цезиевых фотокатодов. Естественным оказался вопрос и о «разбухании» фотоэлектронного пучка при его движении к экрану, с учетом многочисленных aberrаций высших порядков, которые вносятся фокусирующей электронной линзой и отклоняющей системой.

В период 2002–2007 гг. Э.Л.Нолле в отделе фотоэлектроники поставил работы по изготовлению быстродействующих фотокатодов, испытанию их спектральных характеристик и теоретической интерпретации полученных результатов. Было обнаружено, что в гранулированных пленках серебра, активированных цезием и кислородом (для снижения работы выхода), с размером наночастиц 10–50 нм, возникает (за счет размерных эффектов) новая интенсивная полоса фотоэлектронной эмиссии с максимумом на длине волны  $\sim 500$  нм и со спектральной чувствительностью до 4 мА/Вт (что соответствует квантовой эффективности электрон/фотон  $10^{-2}$ ). Анализ показал, что фотоэмиссия в таких наноструктурированных Ag-O-Cs-фотокатодах обусловлена возбуждением поверхностных плазмонов в наночастицах серебра, а спектральная чувствительность определяется размерами, геометрической формой и распределением этих наночастиц в фотоэмиттере. В известных ранее фотокатодах классического типа (с объемным фотоэффектом) фотоэлектронам до выхода в вакуум приходится преодолевать толщину катода, и постоянная времени в основном задается их движением к поверхности. В наших же Ag-O-Cs-фотокатодах фотоэффект оказывается поверхностным и транспорт фотоэлектронов через объем отсутствует. Нолле [7] показал, что фотоэффект в активированных цезием и кислородом металлических наночастицах серебра определяется вероятностью туннелирования неравновесных фотоэлектронов через потенциальный барьер, образованный активирующим слоем.

При оценке инерционности фотоэмиссии нельзя забывать, что в пикосекундных ЭОП фотокатоды работают при напряженностях электрического поля  $\geq 3$  кВ/мм — это может приводить к смещению энергетических уровней в фотокатодных пленках толщиной 200–300 Å. По-видимому, при таком режиме работы время фотоэмиссии может затягиваться, а разброс начальных энергий фотоэлектронов — увеличиваться. Физика работы фотокатодов в пико-фемтосекундных ЭОП таит еще много непознанного. Важность изучения этой проблемы неоднократно подчеркивал Прохоров. Например, на одном из наших последних обсуждений у него в кабинете в 2001 г. он вдруг выложил на стол бумажный листочек с химическими формулами, описывающими процесс формирования Ag-O-Cs-фотокатодов. Александр Михайлович проявлял неподдельный интерес к исследовательско-технологической цепочке по разработке и изготовлению пикосекундных ЭОП — практически каждую неделю лично беседовал с занятыми в ней сотрудниками. Чтобы лучше разобраться в расхождениях между оценочными и экспериментальными данными, мы сосредоточились на более тщательном анализе и учете временных aberrаций, возникающих на пути движения фотоэлектронного пучка от фотокатода к экрану ЭОП.

### Компьютер, на помощь!

В отделе фотоэлектроники создание программного обеспечения и численное моделирование aberrаций в изображающей пико-фемтосекундной фотоэлектронике многие десятилетия ведутся в лабораториях М.А.Монастырского и В.П.Дегтяревой. Разработаны и активно используются пакеты прикладных программ (ELIM/DYNAMICS, MASIM), в основу которых положены современные подходы вычислительной математики и электронной оптики: метод интегральных уравнений теории потенциала, теории разностных схем, асимптотические методы теории возмущений, теория aberrаций эмиссионных изображающих систем и т.д. В последние годы реализован алгоритм в виде отдельного модуля в пакете MASIM, позволяющий рассчитывать траектории заряженных частиц с учетом кулоновского взаимодействия, которое рассматривается как возмущение. Численные оценки кулоновского расплывания фотоэлектронных пучков фемтосекундной длительности объясняют многие причины, замедляющие продвижение к желанному 10-фемтосекундному пределу. Более того, всестороннее компьютерное моделирование подсказывает способы преодолеть достигнутый на сегодня 200-фемтосекундный барьер.

Проиллюстрируем сказанное. Типичная картина фокусировки электронных пучков во время анализа ЭОП с электростатической фокуси-

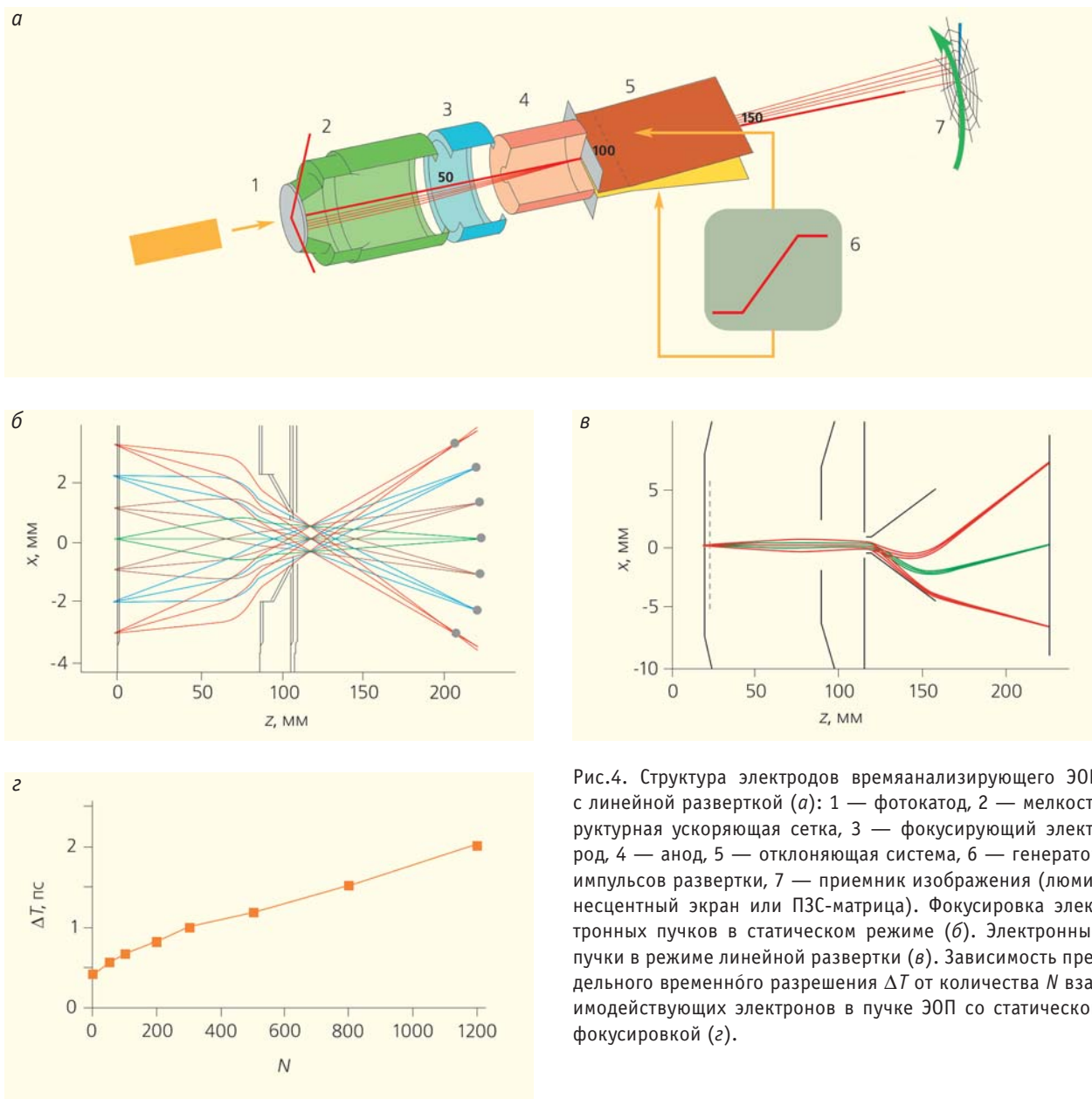


Рис.4. Структура электродов времяанализирующего ЭОП с линейной разверткой (а): 1 — фотокатод, 2 — мелкоструктурная ускоряющая сетка, 3 — фокусирующий электрод, 4 — анод, 5 — отклоняющая система, 6 — генератор импульсов развертки, 7 — приемник изображения (люминесцентный экран или ПЗС-матрица). Фокусировка электронных пучков в статическом режиме (б). Электронные пучки в режиме линейной развертки (в). Зависимость предельного временного разрешения  $\Delta T$  от количества  $N$  взаимодействующих электронов в пучке ЭОП со статической фокусировкой (z).

ровкой и линейной разверткой щелевых изображений (его конструкция дана на рис.4,а) приведена на рис.4,б,в. Хорошо видна кривизна изображения, обусловленная различием условий фокусировки приосевых и внеосевых пучков. Линейная развертка, осуществляемая с помощью отклоняющей системы, вносит дополнительные aberrации. Если их не учитывать, достижимое временное разрешение  $\Delta T$  при напряженности поля у фотокатода 3 кВ/мм будет зависеть от количества  $N$  взаимодействующих электронов в пучке, как показано на рис.4,г. И оказывается, что наличие в электронном пучке всего лишь 300 взаимодействующих электронов приводит (в условиях численного эксперимента для реально существующих ЭОП) к более чем двукратному падению предельного временного

го разрешения: от  $\sim 400$  фс до 1 пс. Очевидно, что длительность сформированного на экране ЭОП электронного пучка меняется в зависимости как от  $N$ , так и от максимального разброса начальных энергий фотоэлектронов  $\Delta \mathcal{E}_{\max}$ . При достаточно большом разбросе этих энергий ( $\geq 0.3$  эВ) кулоновское взаимодействие в пучке невелико и временное уширение пучка определяется в основном хроматическими aberrациями. Напротив, при небольшом  $\Delta \mathcal{E}_{\max}$  ( $< 0.1$  эВ) электронный пучок, будучи достаточно плотным, подвергается сильному воздействию кулоновских сил, которые и становятся причиной его временного уширения.

Итак, «лобовая атака» по продвижению за 200-фемтосекундный барьер путем повышения напряженности поля у фотокатода, увеличения ско-



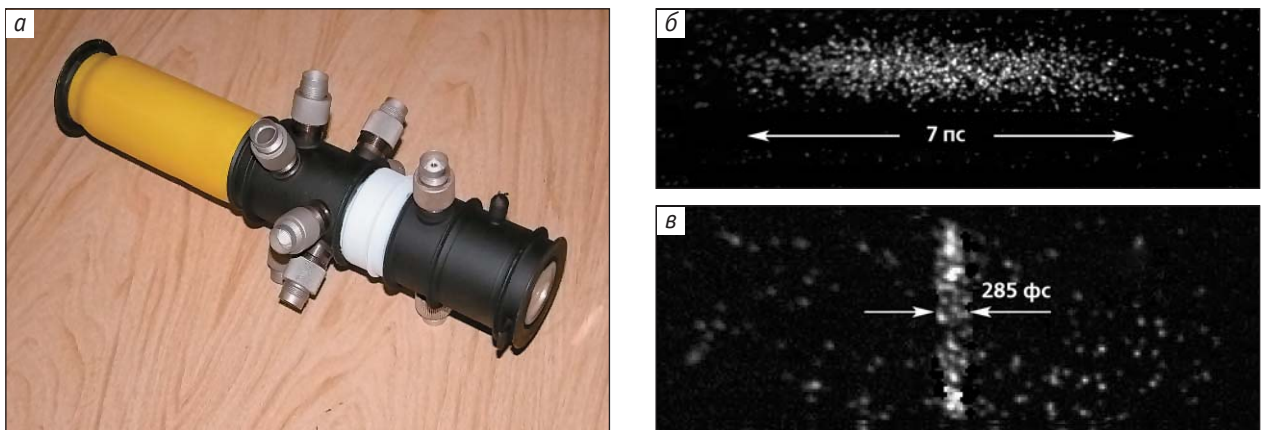


Рис.5. Фемтосекундная фотоэлектронная пушка ИОФ РАН с нестационарными фокусирующими полями (а). Эпограмма исходного 7-пикосекундного лазерного импульса (б) и сжатого до 285 фс электронного пучка (в). Скорость развертки  $8 \cdot 10^{10}$  см/с.

рости развертки и тому подобных методов в определенной степени захлебнулась. После тщательного анализа было предложено абсолютно новое решение проблемы, чему способствовали интенсивные обсуждения возникшей проблемы с Прохоровым в течение 2000–2001 гг.: кроме традиционной электростатической линзы (для пространственной фокусировки фотоэлектронных изображений) использовать дополнительную — для их временной фокусировки. Принципиальная возможность пространственно-временной фокусировки электронных пучков в нестационарных (например, периодических во времени) электромагнитных полях хорошо известна и успешно применяется в микроволновых устройствах с непрерывными электронными потоками (клистроне, магнетроне и т.д.), а также в некоторых времяпролетных масс-анализаторах. С середины 1990-х годов в научной литературе обсуждалось подобное воздействие на фотоэлектронные пучки с помощью полей, зависящих от времени. Однако применительно к фемтосекундной фотоэлектронике необходимая теоретическая база не была разработана.

Александр Михайлович одобрил и с энтузиазмом поддержал идею использовать быстроменяющиеся электрические поля для временной фокусировки, чтобы обеспечить субфемтосекундную динамическую компрессию электронных пучков во время их движения от фотокатода к мишени. Очень важно, что такой подход не требует создания сверхвысокой напряженности электрического поля у поверхности фотокатода. Монастырский с сотрудниками теоретически проработали эту идею и создали программное обеспечение, позволяющее прецизионно моделировать динамику сверхкоротких фотоэлектронных пучков в нестационарных фокусирующих полях [8].

На базе компьютерной модели в отделе была сконструирована фемтосекундная фотоэлектронная пушка, где одновременно осуществляется временная и пространственная фокусировка фо-

тоэлектронных изображений (рис.5,а). С помощью такой пушки мы осуществили более чем 20-кратное экспериментальное сжатие исходного 7-пикосекундного фотоэлектронного пучка (рис.5,б,в). Последующие расчеты показали, что при экспериментально достижимых скоростях изменения фокусирующего потенциала на «временной линзе» (свыше 10 кВ/нс) фотоэлектронный пучок длительностью 500 фс с разбросом начальных энергий фотоэлектронов  $\sim 0.3$  эВ может быть сжат до 20 фс. В принципе, при определенных условиях, диктуемых прежде всего экспериментально достижимой скоростью изменения фокусирующего электрического поля, можно рассчитывать на временную компрессию до долей фемтосекунды. Если же говорить о предельной скорости передачи информации в ЭОП с помощью фотоэлектронного пучка, здесь есть огромный запас: дебройлевская длина волны электронных пакетов с энергией 15–30 кэВ составляет менее  $10^{-2}$  нм, что в пределах обеспечивает передачу информации с субаттосекундным ( $10^{-19}$ – $10^{-20}$  с) временным разрешением.

### От принципов к приборам...

Выбирая свой творческий путь, Александр Михайлович решал вопрос: быть инженером или ученым. Став всемирно известным ученым с всеобъемлющим научно-техническим кругозором, он всегда активно поддерживал работы по созданию уникальных материалов и приборов на базе собственных фундаментальных исследований. Среди прочих примеров достойное место занимают и наши пико-фемтосекундные ЭОП, камеры и дифрактометры. Организованная по инициативе Прохорова исследовательско-технологическая цепочка, о которой говорил Фанченко почти 20 лет назад, успешно действует и сегодня, обеспечивая замкнутый цикл работ от постановки задачи до выдачи конечной продукции и ее применений.



Академики И.А.Щербаков (директор ИОФ РАН), А.М.Прохоров (основатель института) и профессор М.Я.Щелев (заведующий отделом фотоэлектроники; крайний слева) обсуждают вопросы пико-фемтофотоэлектроники. 2000 г.

К настоящему времени в отделе разработаны и изготовлены многие сотни экспериментальных образцов времяанализирующих ЭОП и фотоэлектронных пушек, в том числе обеспечивающих временное разрешение в режиме щелевой развертки в сотни фемтосекунд. На их основе построены десятки модификаций экспериментальных электронно-оптических камер (см. примеры на рис.б), работающих, как правило, в режиме щелевой развертки и однокадровой съемки. Выдержавшая испытание временем стрик-камера PS-1/S1 сделана на базе собственных ЭОП ПИФ-01, многократно тиражировалась и была поставлена в ряд академических институтов и других организаций.

Благодаря налаженному Прохоровым международному научно-техническому сотрудничеству многие из увидевших свет электронно-оптических камер создавались в содружестве с ведущими приборостроительными фирмами мира: «Hadland-Photonics» (Англия), «CORDIN» (США), «Hamamatsu» (Япония), «Thomson-CSF» (Франция), «Vitek» (Ю.Корея), «Optronis» (Германия). Но базовым элементом всех этих камер всегда оставались отечественные времяанализирующие ЭОП. Хорошим примером служит 1.5-пикосекундная стрик-камера «ИМАКОН-500», распространенная по всему миру в нескольких сотнях экземпляров. Партия пикосекундных электронно-оптических камер, работающих в режимах щелевой развертки и синхроскана, была выпущена совместным российско-американским предприятием «PROSCHEN» (PROkhorov, SCHElev, Nebeker). Экспериментальную 1.4-пикосекундную стрик-камеру мы сделали на фирме «Hamamatsu» совместно с японскими специалистами. Построенные нами и с нашим участием электронно-оптические камеры успешно используются российскими и зарубежными исследователями в самых различных областях науки и техники, в том числе в области физики лазеров, лазерной плазмы и лазерного термоядерного синтеза, волоконной и нелинейной оптики, биомедицины и нанохирургии, фемтохимии и синтезе новых материалов, в оборонных технологиях. Отдельные примеры таких применений приведены ниже [9].

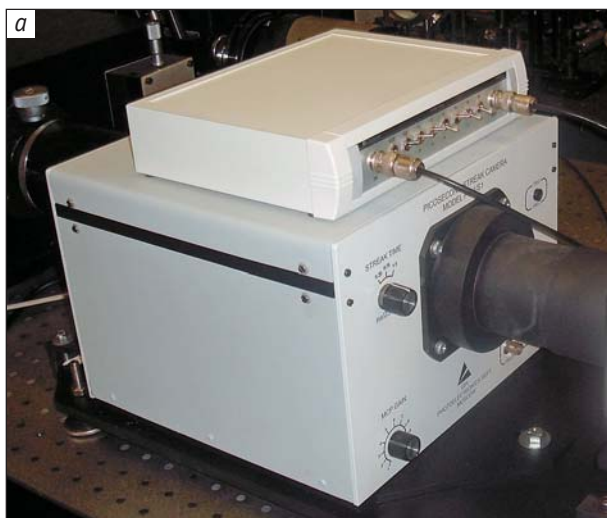


Рис.б. Пико-наносекундная ЭОК модели PS-1/S1 (а) и 75–115-мегагерцовый синхроскан (б).

...в лазерных исследованиях

Уникальные параметры разрабатываемой нами с 1962 г. электронно-оптической аппаратуры, специально ориентированной на задачи лазерной физики, позволили обнаружить принципиально новые явления, наблюдение которых другими способами было недоступно. Разрешение первых экспериментальных камер (200 пс), работавших в стрик-режиме, позволило в 1965–1968 гг. в лаборатории люминесценции ФИАН (группа А.М.Леонтовича) изучить генерационные характеристики одного из первых в мире рубиновых лазеров с модулированной добротностью. В частности, на ЭОП были получены фотографии поля генерации в ближней и дальней зонах, установлены формы волнового фронта и пространственно-временной когерентности; спектрально-временное поведение лазерного излучения. Исследователи убедились, что излучение в таком лазере возникает на оси активного элемента, а затем распространяется на периферию, в центре же происходит «выедание» инверсной заселенности (рис.7).

Тогда же эксперименты, поставленные в ФИАН под руководством А.М.Прохорова, С.Л.Мандельштама и П.П.Пашинина, позволили с помощью нашей электронно-оптической аппаратуры [10] выяснить механизмы продольного развития искры, образованной при фокусировании излучения рубинового лазера в воздухе. Стрик-развертка позволяет понять, что фронт искры движется скачкообразно: после возникновения пробоя он идет со скоростью  $(1-4) \cdot 10^7$  см/с в сторону линзы непрерывным образом лишь на небольшом отрезке длиной около 0.3 мм, а затем возникает пробой в следующей точке, расположенной по направлению к линзе на расстоянии от фронта около 0.3–0.5 мм. Наблюдение поперечного разлета плазмы лазерной искры показало, что он начинается со скоростью  $6 \cdot 10^6$  см/с сразу же после прохождения переднего фронта. Самое интенсивное свечение искры продолжается примерно в течение 150 нс после первоначального пробоя. Иначе говоря, продвижение области ионизации к линзе происходит путем последовательных пробоев в отдельных точках и последующего гидродинамического движения из каждой такой точки.

Когда в конце 60-х были созданы первые лазеры на неодимовом стекле, работающие в режиме пассивной синхронизации мод на нелинейном поглотителе, только с помощью пикосекундных ЭОП (к 1976 г. наши приборы вышли на уровень временного разрешения 0.7 пс) удалось выявить тонкую временную структуру в их выходном излучении (рис.8,а,б). Оказалось, что ответственность за эту структуру несут нежелательные отражения, присутствовавшие в лазерном резонаторе. И наоборот, при решении проблемы прецизионной калибровки скорости стрик-развертки и пас-

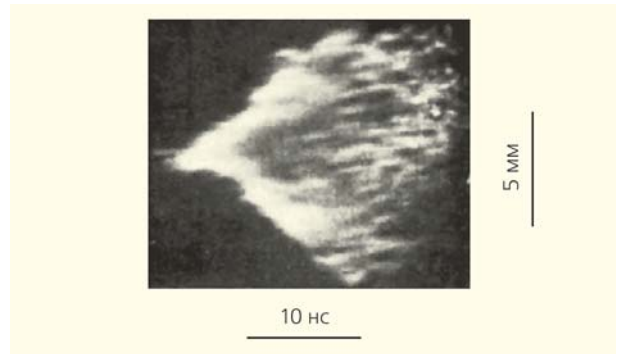


Рис.7. Динамика поля излучения рубинового лазера с модулированной добротностью в ближней зоне. Исследования проводились в ФИАН в 1965–1966 гг. с помощью субнаносекундной камеры, разработанной там же (1962–1964) на базе ЭОП типа УМИ-93.

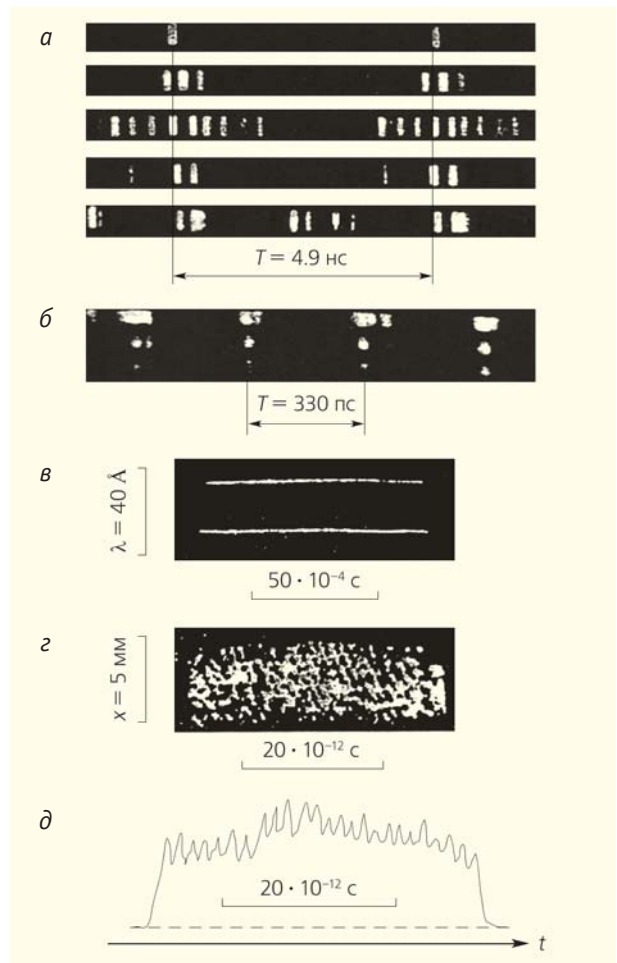


Рис.8. Временная структура излучения Nd-лазера с пассивной синхронизацией мод внутри последовательных аксиальных интервалов (а), тонкая временная структура излучения внутри одиночного аксиального интервала (б). Спектр излучения двухчастотного Nd-лазера (в), соответствующие оптические биения с периодом модуляции 1.4 пс (г), микроденситограмма биений (д).

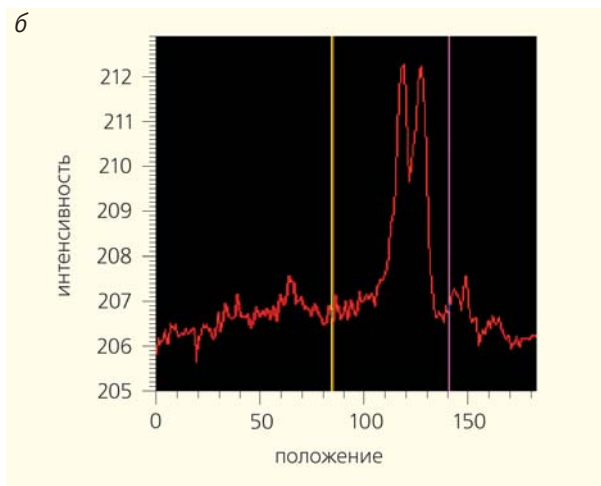
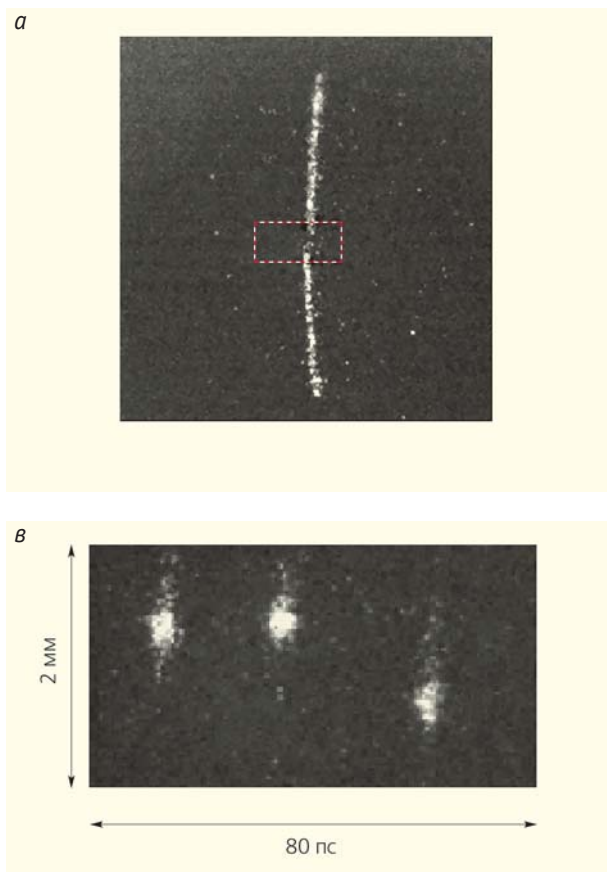


Рис.9. Фотография с экрана PS-1/S1 развернутого во времени изображения щели (а) и микроденситограмма выделенной области (б). Расстояние между «верхней и нижней» частями импульса — 1.66 пс. Пространственное и временное распределения излучения каждого из трех лазерных каналов на мишени (в, изображение сфотографировано с экрана ЭОК PS-1/S1).

портизации временного разрешения пикосекундных ЭОК на помощь пришли сами лазеры. В.В.Коробкин и Н.С.Воробьев с сотрудниками построили собственные калибровочные лазеры, генерирующие только две спектральные компоненты с регулируемым спектральным интервалом между ними. Когда такое излучение подается на фотокатод ЭОП, фотоэлектронный поток модулируется во времени с периодом, определяемым разностью частот двух компонент. Используя один ЭОП для развертки компонент, а другой для регистрации промодулированного излучения, можно было измерять контраст эопограмм в зависимости от периода модуляции и таким образом находить временное разрешение ЭОП. Этот «принцип биений мод» до сих пор служит нам надежным метрологическим средством для калибровки скорости щелевой развертки и определения предельного временного разрешения стрик-камер (рис.8,в–д).

ЭОК PS-1/S1 с щелевой разверткой подтвердила свою пригодность для измерения пространственно-временных характеристик ультракоротких лазерных импульсов, генерируемых петаваттной лазерной установкой «ФЕМТО» в Институте лазерно-физических исследований в Сарове [11]. Выяснилось, что можно установить профиль интенсивности во времени цуга пикосекундных лазерных импульсов, если последние отстоят друг от друга во времени на единицы пикосекунд (рис.9,а,б).

Неоднократно была доказана перспективность использования пикосекундных ЭОК при изучении взаимодействия греющих лазерных импульсов с поверхностью термоядерной мишени. Так, наши приборы успешно послужили в лаборатории квантовой радиофизики ФИАН, где под руководством Н.Г.Басова, О.Н.Крохина, П.Г.Крюкова и др. в 1967–1970 гг. были поставлены эксперименты по регистрации БПП, происходящих при высокотемпературном нагреве плазмы (10-пикосекундные лазерные импульсы фокусировались на поверхности дейтерида лития) [12]. Удалось установить, в частности, что общая энергия в отраженном свете может достигать 30% от падающей.

По инициативе А.М.Прохорова наши ЭОК использовались для диагностики лазерного термоядерного синтеза в филиале ГОИ (г.Сосновый Бор) в работах, руководимых А.А.Маком. При анализе рентгеновского излучения плазмы, образующейся при облучении мишеней из  $CD_2$  на шестиканальной лазерной установке на неодимовом стекле, оказалось, что оно в значительной мере повторяло временной ход греющего лазерного импульса, хотя релаксация энергии рентгеновского излучения из плазмы происходит медленнее, чем ее накопление. Было показано, что основная масса мишени находится при температуре 150–200 эВ, в то время как в зоне поглощения развивается температура до 3 кэВ. А в 2015 г. на ЭОК

PS-1/S1 совместно со специалистами Института лазерно-физических исследований (г.Саров) были проведены модельные эксперименты по одно-временному контролю в рассеянном свете пространственного и временного распределения на поверхности мишени 100-фемтосекундных одиночных лазерных импульсов, генерируемых титан-сапфировым лазером. Настройка оптических линий задержки в каждом из каналов позволяет регулировать по горизонтали момент прихода греющего импульса с однопикосекундной точностью, определяемой временным разрешением ЭОК, а по вертикали — пространственно совмещать пятна фокусировки пучков с 50–100-микрометровой точностью, которая задается динамическим пространственным разрешением ЭОК (рис.9,в).

### ...в фотобиологии и фемтохимии

Пико-фемтосекундные ЭОК и фотоэлектронные пушки оказались весьма полезными при изучении природы процессов миграции энергии электронного возбуждения в растворах, молекулярных и полупроводниковых кристаллах, при определении реакционной способности электронно-возбужденных состояний молекул. Вместе с коллегами из МГУ (А.Б. и Л.Б.Рубиными, В.З.Пашенко и др.) на базе нашей ЭОК-3 с временным разрешением 2 пс мы создали экспериментальную установку импульсного флуориметра, на которой исследовали температурную зависимость длительности флуоресценции специальной бактериохлорофильной пары, осуществляющей разделение зарядов и первичного акцептора электрона бактериофеофитина. Длительность флуоресценции этого препарата оказалась равной ~7 пс и не изменялась при понижении температуры образца до 77 К. Был сделан вывод, что перенос электронов от бактериохлорофилла к бактериофеофитину осуществляется по туннельному механизму. Очевидно, что импульсная флуориметрия на основе пикосекундных ЭОП позволяет лучше понять механизмы первичного преобразования световой энергии в электрическую, происходящего в реакционном центре высших растений и отличающегося высокой квантовой эффективностью (до 90%). Полученная информация будет способствовать созданию фотоэнергетических устройств, принципы действия которых основаны на первичных фотосинтетических реакциях.

В 1991 г. А.Зивейл, нобелевский лауреат в области фемтохимии, предложил нам разработать фемтосекундную фотоэлектронную пушку для изучения динамики химических реакций в веществе. Пространственные и временные масштабы процессов, протекающих при трансформациях химических связей (образование и/или разрушение), имеют порядок ангстремов и фемтосекунд. При упругом рассеянии падающего пучка элект-

тронов на электростатических полях атомов энергетическое состояние исследуемой атомно-молекулярной системы в целом практически не изменяется, а типичное время процесса отражения, по оценкам, существенно меньше 1 фс. Поэтому с созданием фемтосекундного дифрактометра становится возможным исследовать не просто атомно-молекулярную структуру вещества, но и кинетику столкновений и взаимодействий атомов, образование новых молекул.

Первая фемтосекундная дифрактометрическая пушка была рассчитана на компьютере с использованием разработанного в отделе пакета программ, спроектирована и изготовлена нами в 1996 г. Эта пушка обеспечивала формирование 500-фемтосекундного фотоиндуцированного импульса электронов с энергией 15–30 кэВ, энергетическим разбросом <0.5 эВ и угловой расходимостью <0.5°. В однократном импульсе содержалось до  $10^3$  фотоэлектронов, а временной профиль импульса мог измеряться на экране пушки в режиме линейной развертки. Для тестирования прибора картина дифракции на алюминиевой фольге толщиной 300 Å [9] была сопоставлена со статической электронограммой для того же образца, снятой в лаборатории В.В.Клечковской в Институте кристаллографии имени А.В.Шубникова РАН на стандартном оборудовании. Структурные данные, полученные обоими способами, совпали с высокой точностью, причем быстродействие нашего фотоэлектронного дифрактометра оказалось почти на 13 порядков выше, чем у обычного электронографа! Отметим, что в условиях проведенных нами сравнительных экспериментов термоэмиссионная пушка электронографа за 7 с эмитирует  $\sim 10^{14}$  электронов, а общее число фотоэлектронов, испущенных входным фотокатодом нашего прибора, не превышает  $10^8$  электронов за  $4 \cdot 10^4$  вспышек. Этот факт свидетельствует об очень высокой чувствительности 500-фемтосекундного фотоэлектронного дифрактометра при приемлемом качестве получаемых изображений.

### ...для диагностики синхротронного излучения

Времяанализирующие ЭОП, ставшие в конце 40-х годов плодом активности в области ядерной физики, оказались вновь востребованными для диагностики синхротронного излучения (СИ) в современных циклических ускорителях [13]. Связано это как с необходимостью прецизионных пространственно-временных измерений параметров густок частиц в циклических ускорителях, так и с использованием СИ в биологии, медицине, современной микроэлектронике и т.п. Для решения поставленных задач потребовалось более чем на порядок величины повысить временное разреше-

ние традиционно используемых систем электронно-оптической диагностики — от двух десятков до единиц и даже долей пикосекунды.

На рис.10,*а,б* приведены примеры регистрации с помощью ЭОК PS-1/S1 импульсов СИ, определяющих параметры электронных банчей в накопителе-охладителе ВЭПП-5 (Институт ядерной физики СО РАН) — ускорителе электронов и позитронов на энергию до 510 МэВ с периметром в 27 м и частотой обращения пучка 11 МГц. Длина ступки в ускорителе составляет 25 см при напряжении на ускоряющем резонаторе 200 кВ, что соответствует длительности импульса СИ ~80 пс. В процессе экспериментов с применением ЭОК PS-1/S1 фиксировалась динамика поведения ступков электронов в накопителе за время около 1000 оборотов, пока пучок затухает. Этот процесс хорошо описывается аналитически, и полученные экспериментальные данные можно сравнивать с расчетными — как для уточнения теории, так и для оптимизации рабочих параметров накопителя. Большой объем новой информации, полученной при регистрации СИ в спектральном диапазоне 400–900 нм с временным разрешением около 1 пс, заставил экспериментаторов-ядерщиков по-новому оценить возможности современных ЭОП. Стрик-камера PS-1/S1 использовалась

также для измерения временных параметров излучения Вавилова—Черенкова. Полученные экспериментальные данные позволяют судить о процессах формирования электронных ступков и их качестве в линейном ускорителе еще до инжекции электронов в накопитель-охладитель. Был сделан вывод о целесообразности применения стрик-камер для достижения оптимальных параметров линейных ускорителей.

Для штатной диагностики СИ в режиме непрерывного сканирования в настоящее время в рамках проекта Российского научного фонда (№14-29-00295) мы разрабатываем на базе ЭОП ПИФ-01, вакуумно-сочлененного с ВЭУ, прибор нового поколения, так называемый пикосекундный диссектор. Предварительные эксперименты по калибровке временного разрешения этого диссектора с помощью 30-фемтосекундного титан-сапфирового лазера показали, что для вновь создаваемого прибора оно приближается к 3–4 пс.

### ...в различных областях физики

В конце 60-х годов в среде специалистов в области нелинейной оптики велась оживленная дискуссия о том, являются ли нити, возникающие при самофокусировке лазерного излучения в нелинейных средах, результатом движения отдельных фокальных точек или они существуют стационарно. В поставленных по инициативе Прохорова работах с помощью нашей электронно-оптической аппаратуры [14] было наглядно продемонстрировано, что при самофокусировке излучения одномодового лазера в 10-сантиметровую кювету с сероуглеродом движутся отдельные точки (по направлению к входному торцу кюветы). Максимальная скорость этого движения  $\sim 3 \cdot 10^9$  см/с, причем число движущихся точек равно числу пятен самофокусировки, наблюдаемых на развертке выходного торца кюветы.

Электронно-оптический метод пригодился и при исследовании комбинационного рассеяния лазерных импульсов в различных средах, например, в растворе  $CCl_4$  и ацетоне [15]. В ФИАН И.Л.Фабелинскому с сотрудниками впервые удалось напрямую измерить с помощью ЭОП длительность пикосекундных импульсов, возникающих в результате самосинхронизации многих стоковых компонент вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна (рассеянный свет представлял собой регулярную последовательность импульсов длительностью 30 пс, следующих с периодом ~220 пс).

При исследовании пространственно-временных и спектральных характеристик стеклянных оптоволокон с пикосекундным временным разрешением было показано, как уширяется во времени лазерный импульс при прохождении через стекловолоконную нить. Особо ценными оказались

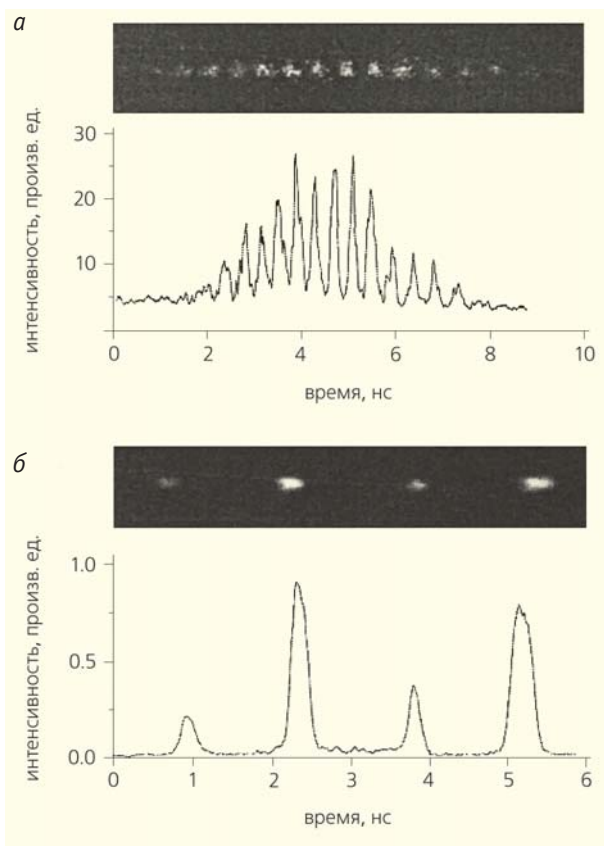


Рис.10. Структура банча, совершившего 10 оборотов после инжекции (а) и несколько сотен оборотов (б).

результаты Е.М.Дианова и В.Е.Фортова с сотрудниками: с помощью ЭОК был обнаружен детонационно-подобный режим разрушения волоконных световодов под воздействием интенсивного лазерного излучения [16]. В волоконных световодах на основе кварцевого стекла было обнаружено, что при воздействии света лазера мощностью ~1 кВт фронт оптического разряда распространяется со скоростью, сравнимой со скоростью звука в стекле (~3 км/с).

В ИРЭ по инициативе Ю.В.Гуляева мы вместе с сотрудниками лаборатории И.Л.Броневого провели прямые спектрально-временные измерения длительности «разгорания» и релаксации отдельных спектральных компонент люминесценции, возбуждаемой в кристалле GaAs [17]. ЭОК PS-1/S1 была совмещена со спектрографом, который выделял отдельную спектральную компоненту излучения, возникающего при накачке кристалла 30-пикосекундными лазерными импульсами. Полученная информация может быть полезна при создании мощных полупроводниковых лазеров и супер-

мощных диодов, предназначенных для генерации сверхкоротких оптических импульсов. Другим важным практическим итогом совместных с ИРЭ экспериментов стал вывод о том, что ЭОК модели PS-1/S1 можно использовать в режиме накопления однократных лазерных импульсов: нестабильность срабатывания нашей камеры оказалась в пределах  $\pm 3$  пс, если для ее запуска использовался сигнал от высокостабильного YAG-лазера.

\* \* \*

Итак, Александр Михайлович Прохоров в 60–90-е годы прошлого столетия организовал крупномасштабные исследования в области сверхскоростной электронно-оптической диагностики и уникального электровакуумного приборостроения. Он инициировал успешное применение времяанализирующих ЭОП в физическом эксперименте, ясно понимая, что ЭОП открывают путь к решению многих задач в науке и технике. Пусть же новые успехи на этом поприще будут посвящены его светлой памяти! ■

## Литература

1. *Endelman L.L.* A brief history of high-speed photography 1851–1930 // Presented at: SPIE 32nd Annu. Int. Tech. Symp. August 16–18, 1988, San Diego California, USA. <https://people.rit.edu/andpph/text-hs-history.html>
2. *Андреев А.Н., Дубовик А.С., Дегтярева В.П. и др.* Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании БПП. М., 2002.
3. *Завейский Е.К., Бутслов М.М., Фанченко С.Д.* С электронно-оптическим преобразователем в мир сверхкоротких времен // Природа. 1970. №8. С.10–20.
4. *Holst G., De Boer J.H., Teves M.C. et al.* // Physica. 1934. V.1. P.295–305.
5. *Courtney-Pratt J.S.* A new method for the photographic study of fast transient phenomena // Research. 1949. V.2. P.287–294.
6. *Прохоров А.М., Воробьев Н.С., Лозовой В.И. и др.* Регистрация излучения Ti:сапфирового лазера с высоким временным и пространственным разрешением // Квантовая электроника. 2002. Т.32. №4. С.283–284.
7. *Нолле Э.Л.* Туннельный механизм фотоэффекта в активированных цезием и кислородом металлических наночастицах // УФН. 2007. Т.177. С.1133–1137.
8. *Monastyrskiy M.A., Greenfield D.E., Lozovoi V.I. et al.* New computer modeling and experimental results on a photoelectron gun with time-dependent electric field. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2007. V.16(4). P.248–253.
9. *Щелев М.Я.* Пико-фемто-аттосекундная фотоэлектроника (взгляд через полувековую лупу времени) // УФН. 2012. Т.182. №6. С.649–656.
10. *Коробкин В.В., Мандельштам С.Л., Пашинин П.П. и др.* Исследование «искры» в воздухе, возникающей при фокусировании излучения лазера // ЖЭТФ. 1967. Т.53. Вып.1(7). С.116–123.
11. *Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С. и др.* Оценка пригодности пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок // Квантовая электроника. 2014. Т.44. Вып.8. С.798–800.
12. *Басов Н.Г., Крохин О.Н., Крюков П.Г. и др.* Исследования плазмы, образованной ультракороткими лазерными импульсами // Квантовая электроника. 1971. №1. С.4–28.
13. *Верещагин А.К., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б. и др.* Регистрация синхротронного излучения пикосекундной стрик-камерой для диагностики пучков в циклических ускорителях // Квантовая электроника. 2016. Т.46. №2. С.185–188.
14. *Коробкин В.В., Прохоров А.М., Серов Р.В. и др.* Нити самофокусировки как результат движения фокальных точек // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т.11. С.153–157.
15. *Valat P., Tourbez H., Schelev M.Ya. et al.* Wavelength and time evaluation of multiple stimulated Raman Spectra in CCl<sub>4</sub> excited by an intense picosecond laser pulse // Opt. Commun. 1978. V.25. №3. P.407–411.
16. *Дианов Е.М., Фортов В.Е., Буфетов И.А. и др.* Детонационно-подобный режим разрушения волоконных световодов под действием интенсивного лазерного излучения // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т.83. Вып.2. С.84–88.
17. *Агеева Н.Н., Бронева И.Л., Забегаев Д.Н. и др.* Пикосекундное «разгорание» и релаксация интенсивного стимулированного излучения GaAs // ЖЭТФ. 2013. Т.143. Вып.4. С.634–641.

# Лазерная интерферометрия: за занавесом триумфа

Ф.Я.Халили

Четырнадцатого сентября 2015 г. в 09:50:45 по всемирному времени (UTC), т.е. в 12:50:45 по московскому, 40-килограммовые зеркала двух гигантских, с длиной плеча 4 км, лазерных интерферометров Advanced LIGO, расположенных на расстоянии 3 тыс. км друг от друга в штатах Вашингтон и Луизиана в США, почти одновременно (с задержкой примерно 7 мс) исполнили довольно затейливый танец, форма которого задолго до этого была предсказана и детально просчитана астрофизиками. Амплитуда этого танца с «обычной» точки зрения была ничтожно мала — порядка  $10^{-18}$  м (в 100 млн раз меньше размера атома и почти в тысячу — размера атомного ядра). Тем не менее она в несколько раз превысила амплитуду случайных дрожаний зеркал, вызванных в основном сейсмической и тепловыми шумами, что позволило участникам этого проекта с высокой степенью уверенности заявить о регистрации гравитационно-волнового сигнала от произошедшего примерно 1.3 млрд лет назад слияния двух черных дыр [1].

## Полвека усилий

Это событие завершило затянувшийся почти на полвека «эмбриональный» период развития гравитационно-волновой астрономии, в течение которого в мире



**Фарит Явдатович Халили**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Участник научной коллаборации LIGO Scientific Collaboration (LSC). Область научных интересов — квантовая теория измерений, квантовая оптомеханика.

**Ключевые слова:** гравитационные волны, лазеры, квантовые измерения.  
**Key words:** gravitational waves, lasers, quantum measurements.

строились все более и более чувствительные детекторы гравитационных волн, дававшие один и тот же результат: «на уровне чувствительности в ... (конкретные цифры все время уменьшались) гравитационных волн обнаружено не было». Начало этого периода принято отсчитывать с опытов Дж.Вебера, который в 1960 г. предложил идею твердотельного резонансного детектора гравитационных волн (bar detector) [2], а в 1969 г. заявил (ошибочно!) об их регистрации. Вслед за этим в мире, в том числе и в СССР, был построен целый ряд детекторов такого типа, с чувствительностью на несколько порядков лучшей, чем у Вебера; некоторые из них функционируют и сейчас. Однако начиная уже с 70-х годов прошлого века ограниченность возможностей твердотельных детекторов становится все более очевидной; взамен начались разработка и строительство лазерных интерферометрических детекторов, идея которых была предложена М.Е.Герценштейном и В.И.Пустовойтом в 1962 г. [3]. Детекторы Advanced LIGO (аббревиатура расшифровывается как Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория), впервые зафиксировавшие гравитационно-волновой сигнал, по праву считаются самыми совершенными и чувствительными на настоящий момент представителями этого класса приборов. Они наглядно демонстрируют тот колоссальный рывок вперед, который сделала современная техника по сравнению с интерферометрами эпохи Фабри, Перо и Майкельсона, и нельзя не подчеркнуть: эти достижения были бы невозможны без когерентных монохроматических источников света — лазеров, что в очередной раз подтверждает универсальность вклада в науку, внесенного А.М.Прохоровым и его сподвижниками.

© Халили Ф.Я., 2016



Более подробно о том, что такое гравитационные волны, об их астрофизических источниках и принципах детектирования, а также о деталях событий 14 сентября 1915 г. читатель мог недавно прочитать в статье В.Н.Руденко [4]. Здесь же мы сосредоточимся на наиболее фундаментальном классе ограничений, которые природа установила для чувствительности лазерных детекторов гравитационных волн, а именно — на квантовых флуктуациях света в них.

### Как работает лазерный детектор

Несколько упрощая, действие гравитационной волны можно описать как поле приливных ускорений: любое пробное тело массой  $m$ , находящееся от наблюдателя на расстоянии  $L$  перпендикулярно направлению распространения волны (гравитационная волна, как и электромагнитная, является поперечной), испытывает действие приливной силы, равной  $mL\ddot{b}/2$ , где  $b$  — безразмерная «амплитуда» гравитационной волны (так называемая вариация метрики) и  $\dot{b}$  — ее вторая производная по времени. Соответствующая характерная форма силовых линий такого поля изображена на рис.1, сверху.

Основная проблема при регистрации гравитационных волн — крайняя малость значений  $b$  даже для самых мощных астрофизических источников (что, в свою очередь, следует из чрезвычайной слабости взаимодействия гравитационного поля с веществом): например, для события 14 сентября пиковое значение  $b$  составило примерно  $10^{-21}$ . Следовательно, чтобы обеспечить хоть сколько-нибудь заметное смещение пробной массы, надо отнестись к ней как можно дальше. Конечно, при этом нужен еще какой-то способ измерения расстояния до нее; напрашивается решение использовать лазерный дальномер. Наконец, приливная структура поля гравитационной волны (вдоль некоторого направления сила направлена от наблюдателя, поперек этого направления — к наблюдателю) подсказывает, что можно взять две подходящим образом расположенные пробные массы и определять разность расстояний до них. Таким образом, мы естественно приходим к идее использования для детектирования гравитационных волн интерферометра Майкельсона, изображенного на рис.1, внизу.

Проследим за прохождением света в этой схеме, от лазера до фотодетектора. Напряженность

электрического поля световой волны описывается, как известно, гармонической функцией вида

$$A \cos(\omega t + \phi), \tag{1}$$

где  $\omega$  — круговая частота излучения лазера,  $A$  — амплитуда и  $\phi$  — фаза. На светоделителе мощность излучения делится пополам, а их амплитуды, соответственно, на  $\sqrt{2}$ . Пробегая в каждом плече до оконечных зеркал интерферометра (End Test Masses — ETM) и обратно, свет приобретает сдвиги фаз  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , пропорциональные расстояниям до этих зеркал; в итоге волны, возвращающиеся на светоделитель, имеют вид

$$\frac{A}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \phi - \phi_1) \text{ и } \frac{A}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \phi - \phi_2).$$

Чтобы увеличить эффект набора фазового сдвига, используются дополнительные так называемые входные зеркала (Input Test Masses — ITM), заставляющие свет циркулировать в плечах многократно. Светоделитель отправляет сумму и разность этих волн (деленные на  $\sqrt{2}$ ), соответственно, обратно в лазер и на фотодетектор. С учетом того что в реальных экспериментах всегда  $|\phi_{1,2}| \ll 1$ , эти значения с использованием простых тригонометрических преобразований могут быть представлены в виде:

Лазер:

$$A \cos(\omega t + \phi - \phi_-) \cos \phi_- \approx A \cos(\omega t + \phi - \phi_-)$$

(т.е. почти весь свет уходит обратно к лазеру, за вычетом малой доли, пропорциональной  $\phi_-$ ),

Детектор:

$$A \sin(\omega t + \phi - \phi_+) \sin \phi_+ \approx A \phi_+ \sin(\omega t + \phi), \tag{2}$$

где  $\phi_+ = 1/2(\phi_1 + \phi_2)$  и  $\phi_- = 1/2(\phi_1 - \phi_2)$  — дифференциальный сдвиг фаз, пропорциональный дисба-

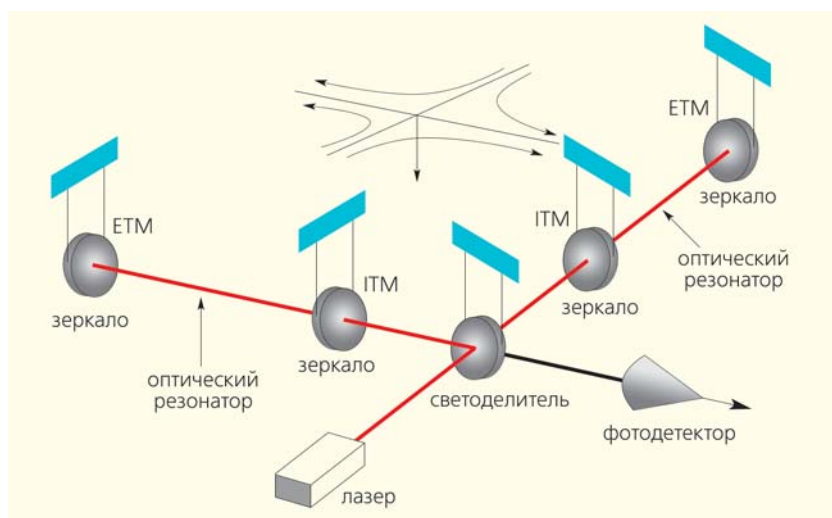


Рис.1. Форма силовых линий гравитационной волны и схема лазерного детектора гравитационных волн на основе интерферометра Майкельсона. ETM — оконечные зеркала, ITM — входные зеркала интерферометра.

[www.ligo.org/science/GW-IFO.phpwww.ligo.org](http://www.ligo.org/science/GW-IFO.phpwww.ligo.org)

лансу длин плеч интерферометра и поэтому содержащий гравитационно-волновой сигнал.

Замечательная особенность этого результата — то, что флуктуации амплитуды  $A$  и фазы  $\phi$ , если они малы (а в реальных экспериментах они малы), фактически не создают дополнительных шумов на выходе. Точнее, они приводят к флуктуациям коэффициента передачи схемы, т.е. вносят некоторую малую погрешность в точность измерения величины сигнала, но не ухудшают чувствительность.

Безусловно, приведенное рассуждение довольно упрощено. В частности, оно предполагает идеальную симметрию интерферометра и не учитывает, что частота лазера не должна выходить за пределы полосы пропускания резонаторов Фабри—Перо в его плечах. Эти, а также множество других обстоятельств приводят к тому, что на самом деле к лазеру накачки предъявляются весьма высокие требования. Он должен быть очень «чистым» (характеризоваться малыми флуктуациями амплитуды, фазы и частоты) и одновременно мощным (почему требуется большая мощность, станет ясно в следующем разделе).

В детекторах Advanced LIGO используются уникальные лазеры, разработанные и изготовленные в Лазерном центре в Ганновере (Германия). Первичным источником света в них служит миниатюрный кристалл Nd:YAG (рис.2, врезка), накачи-

ваемый полупроводниковым лазером. Этот первичный источник выдает мощность 2 Вт на длине волны 1064 нм; затем эти два ватта доводятся до 35 Вт с помощью оптического усилителя мощности (фактически тоже лазера, но дополнительно возбуждаемого первичным источником). Подобная связка носит название MOPA (Master Oscillator/Power Amplifier — генератор/усилитель мощности). В детекторах LIGO первого поколения именно такие системы использовались в качестве лазеров накачки. В Advanced LIGO к ним был добавлен второй каскад усиления НРО (High Power Oscillator — генератор высокой мощности), выдающий мощность, превышающую 200 Вт. Общий вид всей этой сложной системы показан на рис.2.

Несмотря на высокую стабильность излучения этого лазера, ее все равно оказывается недостаточно для детектирования гравитационных волн. Поэтому флуктуации частоты и мощности дополнительно подавляются с помощью большого числа обратных связей; суммарный коэффициент подавления при этом достигает  $10^{81}$ !

В итоге все «технические» проблемы, связанные с лазером накачки, отодвигаются на второй план, наш вывод, что флуктуации лазера не влияют на чувствительность, вновь становится справедливым и на первый план выходят фундаментальные ограничения, связанные с квантовой природой света.

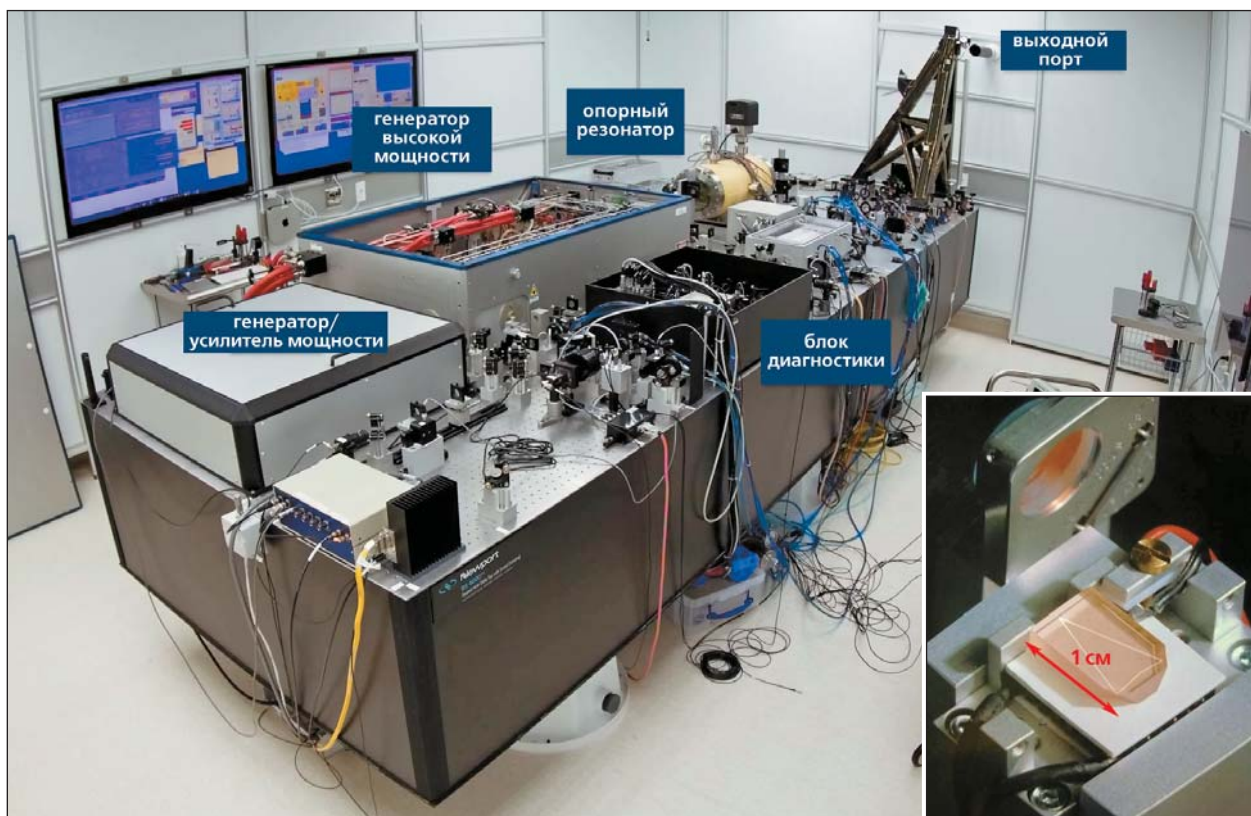


Рис.2. Лазер накачки Advanced LIGO. На врезке показан «затравочный» лазер.

[www.ligo.caltech.edu/page/laser](http://www.ligo.caltech.edu/page/laser)

## Дробовой шум

Наше изложение в этом и следующем разделах по необходимости снова будет упрощенным, но правильно передающим основную суть такого сложного явления, как квантовые флуктуации света в интерферометрах. Более глубоко с этой темой можно ознакомиться, например, в обзоре [5].

Хорошо известно, что любая нагретая и не абсолютно отражающая поверхность служит источником теплового электромагнитного излучения. Более того, в соответствии с квантовой механикой, даже если температура поверхности стремится к абсолютному нулю, она все равно излучает квантовые нулевые колебания. Поскольку энергия кванта видимого света  $\hbar\omega$  соответствует температуре  $\hbar\omega/k$  в несколько десятков тысяч градусов ( $\hbar$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана), для него обычные температуры также «стремятся к абсолютному нулю», и мы имеем дело именно с (почти) нулевыми колебаниями.

В схеме на рис.1 все зеркала, включая светоделиитель, отражают почти идеально, поэтому их излучением можно пренебречь. С лазером мы уже разобрались, остается фотодетектор. Его излучение можно представить в виде:

$$a_c \cos \omega t + a_s \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $\omega$  — частота лазера (на самом деле квантовые нулевые колебания существуют на всех частотах, но в интерферометрах важна именно компонента с частотой лазера),  $a_c$  и  $a_s$  — так называемые косинусная и синусная квадратурные амплитуды, представляющие собой случайные величины с нулевыми средними. Их вариации задаются соотношением неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta a_c \Delta a_s \geq 1/2. \quad (4)$$

В частности, в случае нулевых колебаний эти неопределенности равны друг другу:

$$\Delta a_c = \Delta a_s = 1/\sqrt{2}. \quad (5)$$

Излучение фотодетектора проходит в интерферометре путь, аналогичный пути излучения лазера, т.е. почти целиком возвращаются обратно к своему источнику. В итоге входной сигнал фотодетектора оказывается равен сумме (2) и (3):

$$a_c \cos \omega t + (A\phi_- + a_s) \sin \omega t.$$

Итак, к сигналу добавляется *фундаментальный шум*, создаваемый нулевыми колебаниями света.

Этот шум носит название *дробового*. Название связано с другим объяснением происхождения этого шума, а именно с тем, что любой свет состоит из дискретных случайно летящих квантов. Как это часто бывает в квантовой физике, оба объяснения, хотя и выглядят по-разному, правильные и имеют одни и те же физические корни. Однако объяснение через нулевые колебания оказывается более глубоким и общим, в частности, оно позво-

ляет легко учесть сжатие света. Поэтому мы будем использовать именно его.

В интерферометрах Advanced LIGO используется так называемая гомодинная схема фотодетектирования, измеряющая не всю мощность света на выходе, а только ту ее квадратурную амплитуду, которая содержит полезный сигнал — в данном случае  $A\phi_- + a_s$ . Легко видеть, что при этом ошибка измерения сигнала оказывается равна

$$\Delta \phi_- = \Delta a_s / A, \quad (6)$$

или, с учетом формулы (5),

$$\Delta \phi_- = 1/A\sqrt{2}. \quad (7)$$

Иначе говоря, чтобы «вытащить» малый сигнал  $\phi_-$  на фоне шума  $a_s$ , приходится использовать большую амплитуду  $A$ . Собственно, это и служит источником требования к величине мощности лазера накачки.

Когда детекторы Advanced LIGO зарегистрировали гравитационно-волновой сигнал, они работали в полуотладочном режиме с пониженной мощностью лазера накачки. Последняя составляла 20 Вт, что обеспечивало циркулирование в каждом из плеч интерферометра «всего» 100 кВт (в рабочем режиме циркулирующая мощность должна превысить 800 кВт).

Рисунок 3 показывает, каким образом достигаются такие значения циркулирующей мощности. На пути к интерферометру излучение лазера (несколько ослабленное за счет отбора мощности в упомянутые выше схемы его стабилизации) проходит через зеркало рециркуляции мощности (Power Recycling Mirror — PRM). Это зеркало отражает основную часть света, возвращающегося от интерферометра к лазеру, обратно в интерферометр, увеличивая тем самым эффективную входную мощность в несколько десятков раз. Вторую ступень наращивания мощности создают, по тому же методу, входные зеркала в плечах интерферометра (ITM).

Очевидно, что столь высокая мощность чревата множеством нежелательных последствий, начиная от искажения формы зеркал из-за их нагрева до такого, например, нелинейного явления, как параметрическая неустойчивость (с которой в Advanced LIGO уже столкнулись). Поэтому возникает вопрос: нельзя ли уменьшить  $\Delta \phi_-$  в формуле (6) не за счет увеличения  $A$ , а за счет уменьшения  $\Delta a_s$ ? В конце концов, квантовая теория, в лице соотношения неопределенности (4), не накладывает никаких ограничений на саму эту величину — только на ее произведение с  $\Delta a_c$ .

Такая возможность была впервые осознана К.Кейсом еще в 1981 г. В работе [7] он предложил использовать в лазерных детекторах гравитационных волн так называемый сжатый свет, т.е. свет в квантовом состоянии, в котором неопределенность одной из квадратур, например  $a_s$ , уменьшена («сжата»), а значение второй, в силу соотноше-

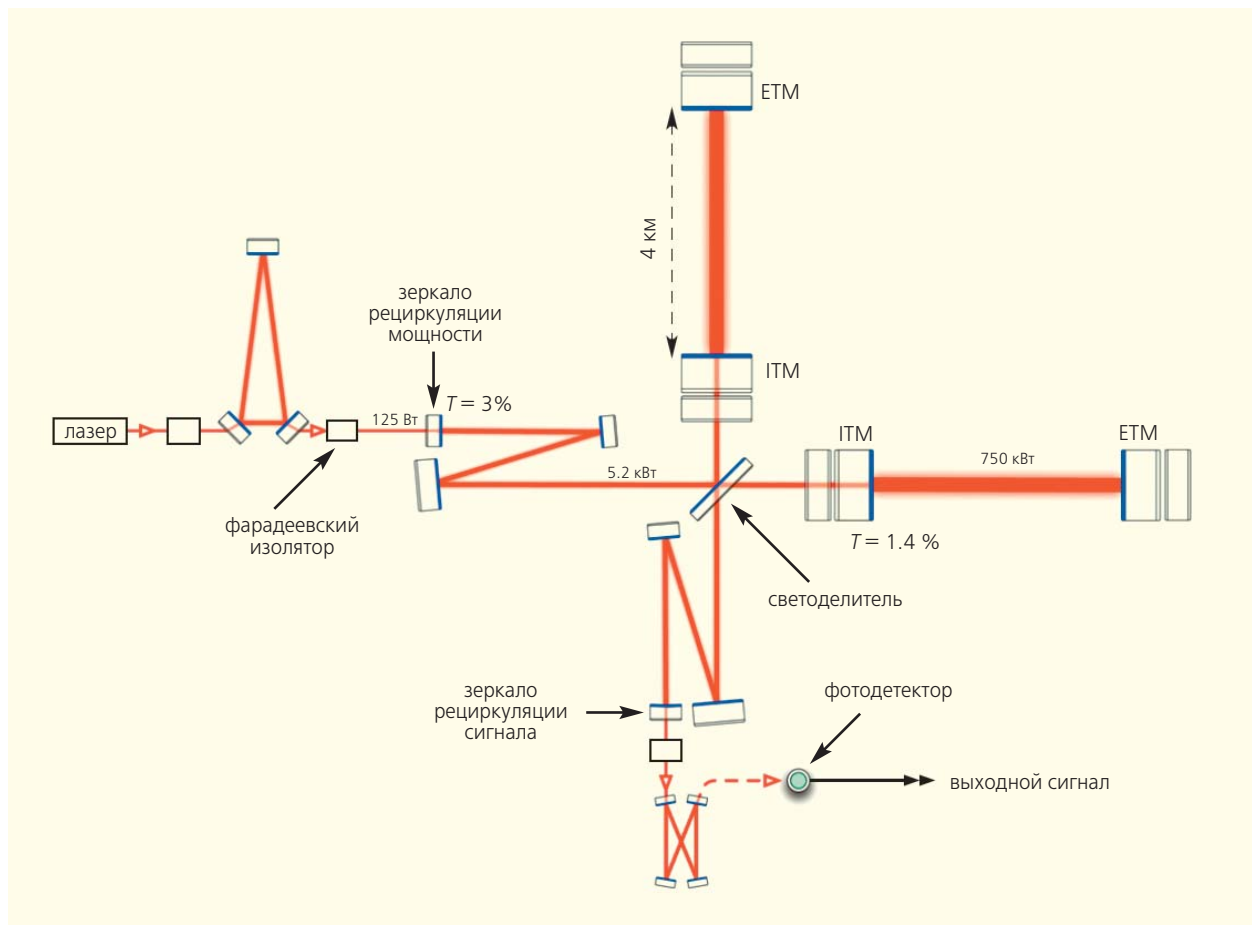


Рис.3. Оптическая схема интерферометров Advanced LIGO [6].

ния неопределенности, пропорционально увеличено. Способ создания такого квантового состояния света известен и именуется параметрической генерацией: если накачивать среду с оптической нелинейностью на частоте  $2\omega$ , она начинает излучать сжатый свет с частотой  $\omega$ .

Идея эта намного опередила свое время и была впервые реализована лишь сравнительно недавно, в 2011 г., на детекторе GEO600, расположенном недалеко от Ганновера (надо отметить, что на этом сравнительно небольшом, с длиной плеч «всего» 600 м, детекторе был протестирован целый ряд новых технологий перед их использованием в «больших» детекторах типа LIGO). Схема GEO600 показана на рис.4. Принципиально она отличается от схемы Advanced LIGO только одним — наличием источника сжатого света (на рисунке выделен желтым).

Работает он следующим образом. Свет от двухваттного лазера, частота которого жестко привязана к частоте основного лазера накачки интерферометра (с длиной волны 1064 нм), подается на схему генерации второй гармоники (Second Harmonic Generator — SHG), которая преобразует его в свет с двойной частотой (и, соответ-

венно, с половинной длиной волны в 532 нм). Это излучение поступает на оптический параметрический усилитель (Optical Parametric Amplifier — OPA), в котором, собственно, и происходит генерация сжатого света, с длиной волны вновь 1064 нм. После этого сжатый свет (его путь на рисунке показан пунктиром) «подсовывается» в интерферометр вместо нулевого излучения от фотодетектора.

Использование сжатого света позволило улучшить чувствительность детектора GEO600 примерно в полтора раза без увеличения оптической мощности. Позже (в 2011 г.) сжатие появилось также и в детекторе LIGO, с тем же примерно результатом. Интересно отметить, что сам источник сжатого света обеспечивал выигрыш примерно в три раза, однако существенная доля этого выигрыша съедалась заметными оптическими потерями в интерферометрах первого поколения, не предназначавшихся изначально для работы со сжатым светом.

Детекторы Advanced LIGO пока обходятся без сжатого света; однако нет никаких сомнений, что в ближайшие годы эта технология найдет свое место и в них.

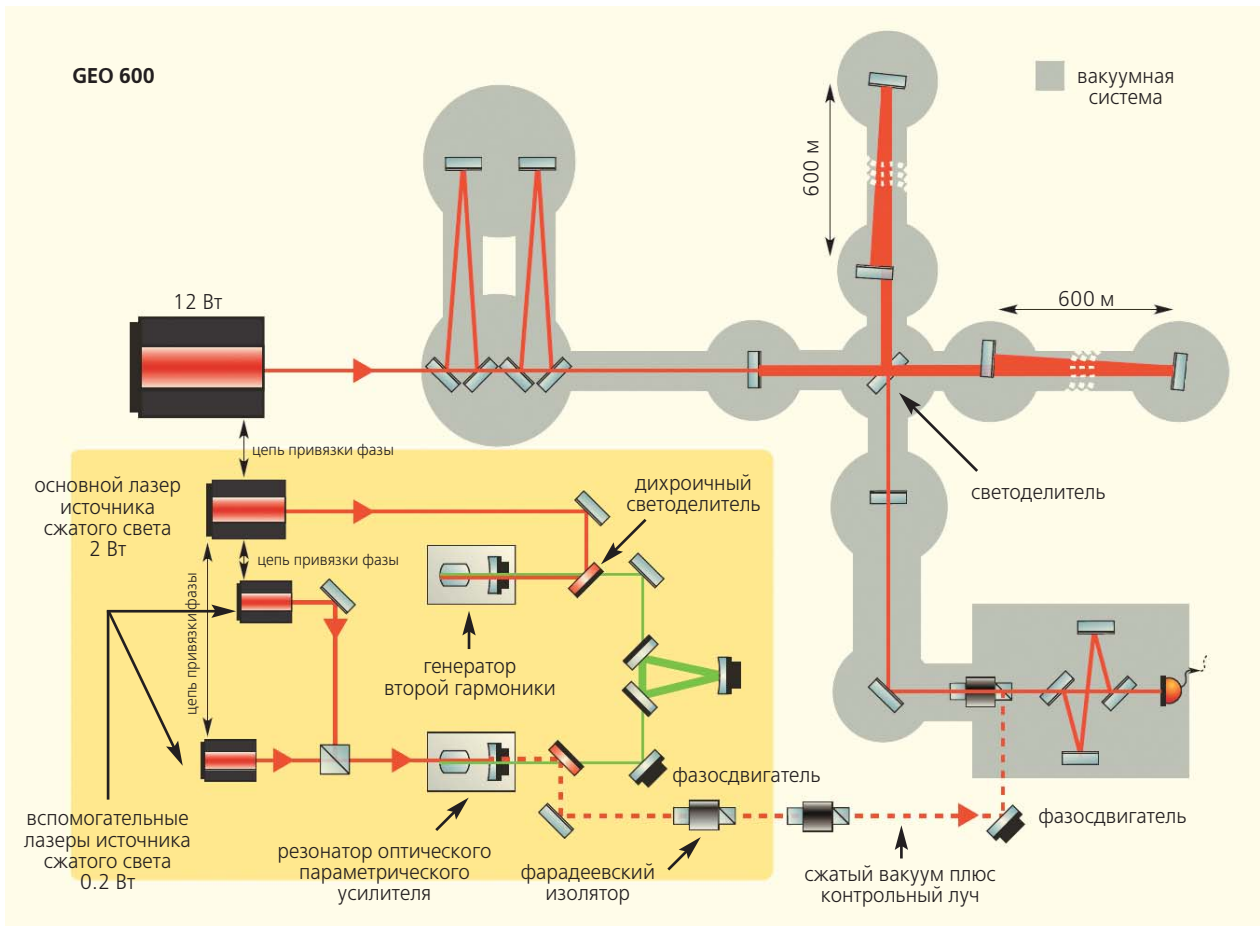


Рис.4. Оптическая схема интерферометра GEO600; источник сжатого света выделен желтым [8].

### Стандартный квантовый предел

Ограничение чувствительности, порождаемое дробовым шумом, давно и хорошо известно в прецизионной спектроскопии. Особенностью детекторов гравитационных волн оказывается лишь их уникальная чувствительность и, соответственно, рекордная оптическая мощность, циркулирующая в их интерферометрах. Но при тех мегаваттных значениях циркулирующей мощности, которые планируются для Advanced LIGO и других детекторов второго поколения, в них начнет сказываться другой тип квантового шума, известный как *шум радиационного давления*, или, в более общем контексте квантовой теории измерений [9], *обратное флуктуационное влияние измерителя*. Наличие этого шума следует из общих принципов квантовой механики. По соотношению неопределенности Гейзенберга, измерение координаты  $x$  механического объекта с точностью  $\Delta x_{\text{meas}}$  сопровождается возмущением  $\Delta p_{\text{pert}}$  его импульса  $p$ , причем всегда

$$\Delta x_{\text{meas}} \Delta p_{\text{pert}} \geq \hbar/2. \quad (8)$$

Возмущение импульса эквивалентно возмущению скорости  $\Delta v_{\text{pert}} = \Delta p_{\text{pert}}/M$ , где  $M$  — масса объекта.

Спустя какое-то время  $\tau$  возмущение скорости приведет к некоторому случайному уходу координаты  $\Delta x_{\text{pert}}$ , которое будет искажать результаты последующих измерений координаты. Например, для (почти) свободных масс, каковыми являются пробные тела лазерных детекторов гравитационных волн, общая погрешность измерения, складывающаяся из  $\Delta x_{\text{meas}}$  и  $\Delta x_{\text{pert}}$ , не может быть меньше, чем

$$\Delta x_{\text{SQL}} = \sqrt{\hbar \tau / M}. \quad (9)$$

Само это значение достигается при некоторой оптимальной точности измерения, равной, как легко показать,  $\Delta x_{\text{SQL}}/\sqrt{2}$ . Наличие данного предела было осознано В.Б.Брагинским почти 50 лет назад [10]; впоследствии он получил название *стандартного квантового предела* — СКП (Standard Quantum Limit — SQL).

В любом реальном эксперименте физическим источником возмущения импульса служит какая-то случайная сила, действующая на пробный объект со стороны измерителя. В случае лазерных детекторов гравитационных волн в этой роли выступают флуктуации силы светового давления на зеркала интерферометра (отсюда название «шум радиационного давления»). Действительно, из

формул (1) и (3) следует, что (мы пренебрегаем здесь малой величиной  $\phi$ ) оптические поля в двух плечах интерферометра пропорциональны

$$(A + a_c)\cos\omega t + a_s\sin\omega t \text{ и } (A - a_c)\cos\omega t - a_s\sin\omega t.$$

Силы светового давления в плечах пропорциональны значениям мощности света, т.е. квадратам напряженности поля в них. Подчеркнем, что нас интересует только разность этих сил, поскольку именно она возмущает разность длин плеч, несущую в себе гравитационный сигнал. Легко показать, что эта разность — дифференциальная сила светового давления — пропорциональна величине

$$F \propto Aa_c.$$

Сравнение этой формулы с (6) показывает, что две квадратурные амплитуды,  $a_c$  и  $a_s$ , «выступают в паре». Последняя создает дробовой шум, и этот эффект обратен пропорционален амплитуде поля накачки  $A$ ; первая создает шум радиационного давления, который прямо пропорционален  $A$ . Отсюда, с учетом соотношения неопределенности для квадратурных амплитуд (4), можно получить соотношение неопределенности (8). Кстати, сжатие света, уменьшая неопределенность  $a_s$  и, как следствие, дробовой шум, пропорционально увеличивает неопределенность  $a_c$  и шум радиационного давления. Поэтому соотношение (8) сохраняется. Соответственно, остается в силе и СКП (9).

Величина СКП для любых сколько-нибудь макроскопических механических объектов чрезвычайно мала. Например, для 40-килограммовых зеркал Advanced LIGO и времени измерения  $\tau \sim 10$  м  $\Delta x_{\text{SQL}} \sim 10^{-19}$  м. Однако эта величина всего в несколько раз ниже чувствительности, уже продемонстрированной Advanced LIGO; его проектная чувствительность как раз соответствует СКП. Поэтому возникает естественный вопрос: а каковы перспективы дальнейшего увеличения чувствительности детекторов гравитационных волн?

Здесь возможны два подхода: либо уменьшать СКП, либо искать способы его преодоления. В рамках первого подхода можно, в частности, увеличивать массу зеркал. Для проектируемых сейчас детекторов третьего поколения рассматриваются зеркала с массами до сотен килограммов. Однако в силу того что величина  $M$  входит в формулу (9) под корнем, выигрыш в чувствительности оказывается невелик, всего в два-три раза. Использование еще более тяжелых зеркал вряд ли возможно из-за технологических ограничений, накладываемых системами их подвеса. Можно также увеличивать длину плеч интерферометра  $L$  — сама величина  $\Delta x_{\text{SQL}}$  при этом не меняется, однако сигнальное смещение зеркал увеличивается пропорционально  $L$ . Например, недавно был предложен проект детектора, использующего в основном те же технологии, что и Advanced LIGO, но с увеличенной в 10 раз, до 40 км (!), длиной плеч [11]. Однако его

перспективы крайне сомнительны по причине финансовых соображений.

Более разумным подходом представляется использование в будущих гравитационных детекторах предлагаемых квантовой теорией измерений методов, не ограниченных СКП. Несмотря на то что наличие СКП следует из фундаментального соотношения неопределенности Гейзенберга, обойти его можно, хотя бы потому, что при детектировании гравитационных волн конечная цель — не следить за координатами зеркал, а обнаружить действующую на них классическую силу со стороны волн.

Развитие таких методов началось еще в 70-х годах прошлого века параллельно в МГУ, в группе, возглавлявшейся тогда В.Б.Брагинским, и в Калифорнийском технологическом институте — профессором К.Торном и членами его группы. В то время стало очевидно, что использовавшиеся тогда твердотельные детекторы гравитационных волн смогут что-то зарегистрировать только при условии повышения их чувствительности по крайней мере на несколько порядков; итоговая чувствительность должна была превзойти СКП. Было предложено несколько методов преодоления СКП; обзор этих ранних работ можно найти в [12].

Они не получили прямого экспериментального продолжения в силу ограниченных возможностей тогдашних технологий, а также из-за того, что для гравитационно-волновой астрономии был выбран другой путь — использование в принципе гораздо более чувствительных больших лазерных интерферометров. Однако сейчас, через несколько десятков лет, ситуация повторяется на новом уровне чувствительности: использование квантовых измерений становится актуальным уже и в лазерных детекторах гравитационных волн.

Схемы таких измерений сейчас активно разрабатываются, и созданная Брагинским группа остается признанным мировым лидером в этой области. В заключение рассмотрим кратко одну из таких схем, а именно квантовый измеритель скорости (quantum speed meter). Измерение скорости, так же как и измерение координаты, подчиняется соотношению неопределенности. Однако возмущаемой величиной здесь оказывается координата. Радикальное отличие от случая измерения координаты и возмущения, соответственно, скорости здесь состоит в том, что для свободной массы возмущение координаты не приводит к последующему возмущению скорости. Поэтому СКП для такого измерения отсутствует. Как можно реализовать такое измерение, показано на рис.5, слева. Здесь фаза выходящего света зависит от разности значений координаты в моменты первого и второго отражений. Если время задержки при этом много меньше характерной длительности сигнала, данную разность можно приближенно представить в виде  $x(t) - x(t - \tau) \approx v(t)\tau$ , где  $v$  — средняя скорость зеркала на этом интервале времени.

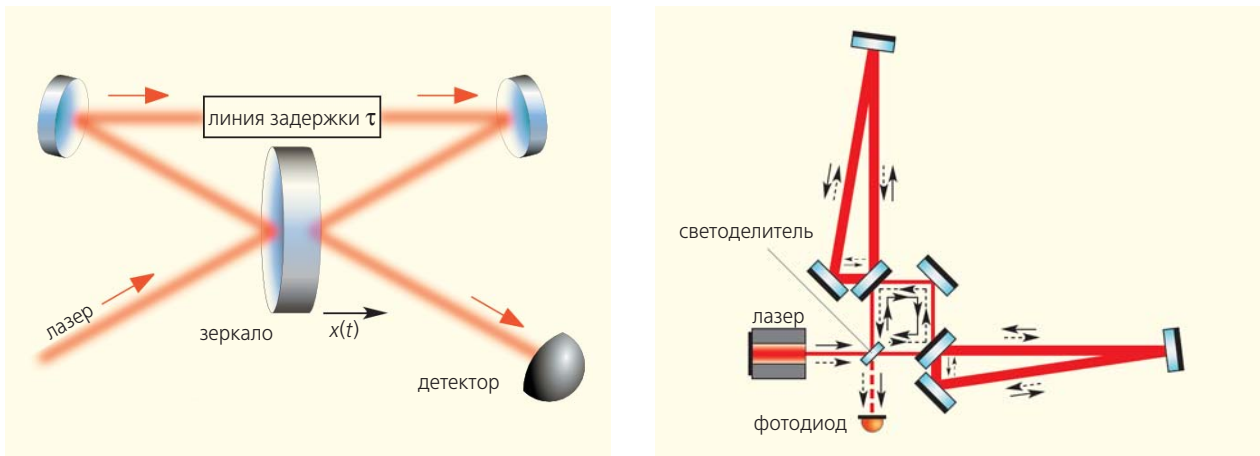


Рис.5. Идея [13] (слева) и практическая схема [14] (справа) квантового измерителя скорости.

Идея эта была предложена в МГУ в 1991 г. [13], после чего в ряде работ как московской группы, так и коллег из Калифорнийского технологического института доработана до практической схемы лазерного детектора гравитационных волн, свободного от СКП. В настоящее время в Университете Глазго (Великобритания) ведется разработка от-

носительно небольшого (10 м) интерферометра, задача которого — продемонстрировать практическую применимость схемы квантового измерителя скорости в будущих детекторах гравитационных волн [14]; схема этого интерферометра приведена на рис.5, справа. Путь к гравитационно-волновой астрономии только начинается! ■

*Во время подготовки этой статьи скончался основатель и многолетний руководитель московской группы LSC Владимир Борисович Брагинский, который был в свое время и членом редколлегии журнала «Природа». Владимир Борисович внес неоценимый вклад в разработку детекторов гравитационных волн и принципов квантовых измерений для них. Ему до некоторой степени повезло: незадолго до смерти он получил в руки ту самую публикацию [1], в число авторов которой он абсолютно заслуженно входит: ведь ее в огромной степени сделали возможной труды члена-корреспондента РАН В.Б.Брагинского (1931–2016).*

## Литература

1. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. Observation of gravitational waves from binary black hole merger // Phys. Rev. Lett. 2016. V.116. P.061102. DOI: 0031-9007/16/116(6)/061102(16).
2. Weber J. Detection and generation of gravitational waves // Phys. Rev. 1960. V.117. P.306–313.
3. Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот // ЖЭТФ. 1962. Т.43. Вып.2(8). С.605–607.
4. Руденко В.Н. След космической катастрофы: первая регистрация гравитационных волн // Природа. 2016. №4. С.15–24.
5. Danilishin S.L., Khalili F.Ya. Quantum measurement theory in gravitational-wave detectors // Living Reviews in Relativity. 2012. V.15(5).
6. Aasi J., Abbott B.P., Abbott R. et al. Advanced LIGO // Classical and Quantum Gravity. 2015. V.32(7). P.074001.
7. Caves C.M. Quantum-mechanical noise in an interferometer // Phys. Rev. D.1981. V.23. P.1693–1708.
8. Abadie J., Abbott B.P., Abbott R. et al. A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit // Nature Physics. 2011. V.7. P.962–965.
9. Braginsky V.B., Khalili F.Ya. Quantum measurement. Cambridge, 1992.
10. Брагинский В.Б. Классические и квантовые ограничения при обнаружении слабых воздействий на макроскопический осциллятор // ЖЭТФ. 1967. V.53. P.1434–1441.
11. Dwyer S., Sigg D., Ballmer S.W. et al. Gravitational wave detector with cosmological reach // Phys. Rev. D. 2015. V.91. P.082001.
12. Braginsky V.B., Vorontsov Yu.I., Thorne K.S. Quantum nondemolition measurements // Science. 1980. V.209(4456). P.547.
13. Braginsky V.B., Khalili F.Ya. Gravitational wave antenna with QND speed meter // Physics Letters A.1990. V.147. P.251–256.
14. Graf C., Barr B.W., Bell A.S. et al. Design of a speed meter interferometer proof-of-principle experiment // Classical and Quantum Gravity. 2014. V.31(21). P.215009.

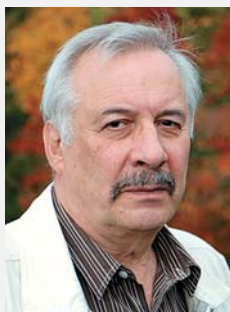
# Релятивистские плазменные зеркала

Буланов С.В.

Для решения многочисленных задач, возникающих в физике, биологии, медицине и в других областях, требуются источники когерентного излучения высокой яркости с различной длиной волны — от СВЧ-диапазона до гамма-лучей. Так, рассеяние рентгеновского излучения на больших молекулах, например, белков, позволяет определить структуру последних, что, в частности, необходимо для разработки новых лекарств. Для этого нужны импульсы с достаточно большим числом фотонов, но малой (аттосекундной) длительности, чтобы за время облучения молекула не успела разрушиться. Данная задача — одна из центральных при создании рентгеновских лазеров на свободных электронах. Фундаментальная же наука нуждается в источниках электромагнитного поля столь большой амплитуды, чтобы можно было наблюдать нелинейные свойства вакуума, предсказываемые квантовой электродинамикой.

## На пути к сверхсильным полям

Согласно квантовой электродинамике физический вакуум — не что пустое и бесструктурное, а, напротив, содержащее виртуальные пары частиц и античастиц. Они существуют в пределах, задаваемых принципом неопре-



**Сергей Владимирович Буланов**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИОФ РАН и приглашенный исследователь Кансайского оптического института (Киото, Япония). Лауреат Государственной премии по науке и технике и премии Европейского физического общества имени Х.Альфвена. Занимается теорией нелинейных волн и теорией ускорения заряженных частиц в космической и лабораторной плазме.

**Ключевые слова:** релятивистская лазерная плазма.  
**Key words:** relativistic laser plasmas.

деленности, который накладывает ограничение на измеримость значений координат и импульса частиц,  $\Delta x \Delta p \geq \hbar$ , или значений времени и энергии,  $\Delta t \Delta \mathcal{E} \geq \hbar$ , т.е. в течение времени  $\Delta t \approx \hbar/mc^2 \approx 10^{-11}$  с (здесь  $\hbar$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в вакууме,  $m$  — масса частицы). Экстремально сильное электрическое поле может поляризовать вакуум и рождать в нем пары частица—античастица. Для этого значение напряженности поля должно быть порядка критической величины, при достижении которой оно может произвести работу, равную  $mc^2$  над электрическими зарядами на расстоянии, равном комptonовской длине волны (характерному масштабу взаимодействия релятивистских частиц в квантовой электродинамике)  $\lambda_c = \hbar/m_e c \approx 2.42 \cdot 10^{-12}$  м ( $m_e$  — масса электрона), т.е. быть порядка  $E_{\text{QED}} = m_e^2 c^3 / e \hbar \approx 10^{16}$  В/см. Доступность таких сильных электромагнитных полей позволит проводить эксперименты по изучению нелинейного вакуума, что принципиально важно для таких теорий, как квантовая хромодинамика и, может быть, квантовая гравитация.

Здесь и далее используется терминология «нелинейный» и/или «нелинейность». В математическом смысле она означает невыполнение принципа линейной суперпозиции. В задачах электродинамики нелинейности процесса проявляется в самодостаточности электромагнитных волн или в их взаимодействии. Например, в классическом пределе уравнения Максвелла не предсказывают взаимодействия электромагнитных волн в вакууме: два электромагнитных импульса пройдут друг сквозь друга без искажения. Если же амплитуды волн настолько велики, что для их описания нужно привлекать аппарат квантовой электродинамики, получается иной результат: волны взаи-



модействуют и в вакууме (такой процесс называют также рассеянием фотона на фотоне). Нелинейность в данном случае обусловлена поляризацией вакуума, которая, в свою очередь, вступает в игру в пределе сильного электромагнитного поля.

Что касается источников экстремально сильных электромагнитных полей, то в земных условиях генерировать электромагнитное излучение сверхвысокой интенсивности способны лазеры. Мощность самых сильных лазеров превышает петаваттный ( $10^{15}$  Вт) уровень. Рекордно высокую мощность генерируемого излучения выдают лазеры с относительно малой энергией одного импульса, но сосредоточенной в сверхкоротком временном промежутке (импульсы фемтосекундной длительности). Работа таких компактных лазеров основывается на механизме модулированной добротности (подробнее см. [1]). По словам создателя лазеров нового поколения, Ж.Муру, открытия методов генерации сверхсильных и в то же время сверхкоротких лазерных импульсов позволило вернуть фундаментальную физику в стены университетов. Ранее сверхмощные электромагнитные поля изучались только в немногих национальных исследовательских центрах, которые были способны построить крупномасштабный лазер, а сейчас они достижимы в университетских лабораториях, где с сильными полями могут работать студенты. Другое преимущество компактных, относительно дешевых (и поэтому доступных для многих научных групп) лазеров состоит в том, что они с легкостью могут быть установлены вблизи больших установок, например ускорителей. Примером тому служит серия экспериментов по проверке эффектов нелинейной электродинамики, которая была выполнена на Стэнфордском ускорителе в США [2]. Там проверялась способность сильной электромагнитной волны породить электрон-позитронные пары в вакууме в процессе ее взаимодействия с другими фотонами высокой энергии (пучок ультрарелятивистских электронов, разогнанных на линейном ускорителе SLAC, взаимодействовал с мощным лазерным импульсом, излучал гамма-фотоны, которые затем порождали электрон-позитронные пары в вакууме в процессе взаимодействия с лазерным полем).

Полученное на сегодня максимальное значение интенсивности света (при фокусировке лазерного излучения в пятно размером порядка его длины волны) равно примерно  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>. Оно пока на семь порядков величины ниже интенсивности электромагнитного излучения, соответствующей критическому электрическому полю квантовой электродинамики ( $cE_{\text{крит}}^2/4\pi \approx 10^{29}$  Вт/см<sup>2</sup>). Чтобы достичь желаемого уровня, необходимо или увеличить мощность лазеров на семь порядков, что, очевидно, представляет задачу не для ближайшего будущего, или использовать другие подходы. Известно несколько таких путей, на которых можно попытаться получить сверхсильное электромагнитное излучение. Так, способно помочь использование

нелинейных процессов в плазме (здесь поляризация среды обязана электронам и ионам, из которых плазма состоит).

В статье мы обсудим концепцию «релятивистского летящего зеркала» (relativistic flying mirror) [3]. В процессе взаимодействия с плазмой мощное электромагнитное излучение создает возмущения концентрации электронов, которые представляют собой тонкие плотные слои частиц, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света в вакууме, т.е. плотные ступки релятивистских электронов в виде тонких оболочек. Если электромагнитная волна (это может быть второй лазерный импульс) отражается от такого релятивистского электронного слоя, его частота и амплитуда, согласно теории относительности, изменятся. Решение задачи об отражении света от релятивистского зеркала привел еще А.Эйнштейн для пояснения основных положений специальной теории относительности в своей опубликованной в 1905 г. работе [4]. Релятивистские зеркала также привлекаются в качестве теоретической модели в квантовой теории поля (см. [5]).

Поскольку кроме указанных выше имеется и много других различных приложений источников электромагнитного излучения с перестраиваемыми параметрами, интерес к реализации релятивистских зеркал в условиях земных лабораторий неудивителен. В прошлом эта проблема поднималась не один раз; привлекает к себе пристальное внимание она и в настоящее время. В качестве первых кандидатов рассматривались пучки релятивистских электронов, ускоренных стандартными ускорителями заряженных частиц, и движущиеся с релятивистской скоростью ионизационные фронты.

В условиях эксперимента параметры релятивистских электронных пучков и ионизационных фронтов (концентрация электронов, ширина фронта и т.д.) таковы, что отраженная электромагнитная волна оказывается в СВЧ-диапазоне, т.е. ее длина волны по порядку величины равна нескольким миллиметрам, поэтому для отражения лазерного излучения с микрометровой (и менее) длиной волны такие объекты не подходят. Возникает вопрос, как создать релятивистское зеркало, движущееся с такой скоростью, что отраженное лазерное излучение попадает в рентгеновскую область. Ответ на него можно найти на пути использования нелинейных процессов в релятивистской лазерной плазме.

## Нелинейности плазмы

В плазме электроны под действием волны колеблются с частотой поля. Если электрическое поле в волне с частотой  $\omega_0$  равно  $E_0$ , амплитуда осцилляций электронов, вычисленная в нерелятивистском по энергии частиц приближении, равна

$r_e = eE_0/m_e\omega_0^2$  ( $e$  и  $m_e$  — электрический заряд и масса электрона). Это выражение следует из решения уравнений движения электрона в периодическом электрическом поле ( $d^2r/dt^2 = -eE_0\cos(\omega_0 t)/m_e$ ). Амплитуду осцилляций электрона можно представить в виде  $r_e = \lambda(v_e/2\pi c) = \lambda a_0/2\pi$ , где  $v_e = eE_0/m_e\omega_0$  — осцилляторная скорость электрона и  $a_0 = eE_0/m_e\omega_0 c$  — безразмерная амплитуда волны. Мы видим, что в нерелятивистском пределе,  $v_e/c \ll 1$  или  $a_0 \ll 1$ , электрон колеблется с амплитудой, меньшей длины волны  $\lambda = 2\pi c/\omega_0$ . Ультрарелятивистскому пределу отвечает  $a_0 \gg 1$ .

Поведение электромагнитного поля в плазме существенным образом зависит от плотности электронов. Электрическое поле, появляющееся в плазме с плотностью  $n$  при смещении электронов относительно ионов на расстояние  $r_e$ , пропорционально произведению плотности электронов на смещение:  $E = 4\pi n e r_e = 4\pi n e^2 E_0/m_e \omega_0^2$ . Отношение этого поля к значению электрического поля в волне имеет вид  $4\pi n e^2/m_e \omega_0^2 = (\omega_{pi}/\omega_0)^2$ . Здесь  $\omega_{pi} = \sqrt{4\pi n e^2/m_e}$  — плазменная (или ленгмюровская) частота, которая служит мерой характерного времени ( $\approx 2\pi/\omega_{pi}$ ) отклика плазмы.

В плазме изменяется закон дисперсии электромагнитных волн: в вакууме дисперсионное уравнение, связывающее частоту  $\omega$  с волновым вектором  $\mathbf{k}$ , имеет вид  $\omega^2 = k^2 c^2$ , а в плазме мы имеем  $\omega^2 = k^2 c^2 + \omega_{pi}^2$ . Можно сказать, что фотоны в плазме приобретают «массу». Свойства самосогласованного поля в плазме таковы, что в дополнение к поперечным электромагнитным волнам существуют продольные плазменные, или ленгмюровские, волны. В этих волнах имеется только электрическое поле, которое колеблется с ленгмювской частотой  $\omega = \omega_{pi}$ .

Электромагнитные и ленгмюровские волны большой амплитуды, распространяясь в плазме, не являются независимыми, поскольку могут взаимодействовать друг на друга. Благодаря такому нелинейному взаимодействию происходит преобразо-

вание волн одного типа в другой. Особенно интересно для нас генерация короткими лазерными импульсами регулярных ленгмюровских волн; в этом случае последние называются кильватерными. Данный термин обязан своим происхождением аналогии между плазменными волнами, образующимися за коротким лазерным импульсом, и кильватерными волнами, остающимися на поверхности спокойного моря в следе за кораблем, как это видно на фотографии, показанной на рис. 1.

В кильватерных плазменных волнах электрическое поле, которое также называется кильватерным полем, имеет подходящую для ускорения частиц структуру: у него относительно большая длина волны и направлено оно вдоль оси распространения лазерного импульса. В плазме с относительно малой концентрацией фазовая скорость кильватерных волн может быть сколь угодно близка к скорости света. Учитывая то, что электроны, инжектированные в волну со скоростью, близкой к ее фазовой скорости, могут приобрести большую энергию, Т.Таджима и Дж.Доусон (см. [1]) предложили использовать кильватерные электрические поля для ускорения заряженных частиц. При этом чем реже плазма, тем выше фазовая скорость кильватерных волн и тем до больших энергий могут быть разогнаны электроны. По сути мы имеем дело с микроскопическим аналогом линейного ускорителя заряженных частиц. В плазменных ускорителях разгоняющее частицы электрическое поле не имеет таких ограничений на свою величину, как в обычных установках. В результате становится возможным создание компактных ускорителей с размерами намного меньшими, чем у стандартных. Например, недавно достигнутое таким способом в Национальной лаборатории имени Э.Лоуренса в Беркли (США) значение энергии электронов равно 4.2 ГэВ при размере лазерного ускорителя приблизительно в 10 см [6]. Для сравнения: стандартные линейные ускорители, способные ускорять электроны до такой энергии, имеют длину порядка километра.



Рис. 1. Кильватерные волны, остающиеся на поверхности моря в следе за моторной лодкой. Это так называемые корабельные волны, или волны Кельвина. Параметрическая зависимость координат линий постоянной фазы волн задана выражениями  $x = X \cos \psi (1 - (1/2) \cos^2 \psi)$ ,  $y = X \cos^2 \psi \sin \psi$  с параметрами  $X$  и  $\psi$  (последний изменяется в интервале  $[-\pi/2, \pi/2]$ ).

### Как волна отражается

Концепция релятивистского зеркала основана на двойном эффекте Доплера, который приводит к изменению частоты излучения, отраженного от релятивистского зеркала в соответствии со следующим выражением (его можно найти в той старой статье Эйнштейна [4]):

$$\omega_r = \omega_0 \frac{1 + 2\beta_m \cos\theta_0 + \beta_m^2}{1 - \beta_m^2} \quad (1)$$

В данной формуле  $\omega_0$  и  $\omega_r$  — частоты падающего и отраженного излучения,  $\beta_m = v_m/c$  — отношение скорости зеркала  $v_m$  к скорости света в вакууме, а  $\theta_0$  — угол падения электромагнитной волны на зеркало (рис.2).

Этот результат можно объяснить качественно и количественно, если обратиться к кинематике световых лучей, изображенной на рис.3. Используя элементарную математику, легко получить, что для промежутка времени между падающими пучками  $\delta t_0$  промежуток времени между отраженными пучками равен  $\delta t_r = \delta t_0(1 - \beta_m)/(1 + \beta_m)$  — в соответствии с формулой (1).

Если зеркало движется со скоростью, близкой к скорости света, знаменатель в правой части формулы (1) очень мал. В пределе  $v_m \rightarrow c$  частота отраженного света возрастает приблизительно в  $4\gamma_m^2$  раз ( $\gamma_m = 1/\sqrt{1 - v_m^2/c^2}$  — релятивистский гамма-фактор). Вследствие этого частота отраженного излучения во много раз превышает частоту падающей на зеркало электромагнитной волны. В приблизительно  $4\gamma_m^2$  раз происходит и сжатие электромагнитного импульса в продольном направлении (см. рис.3), что, в свою очередь, может приводить к повышению интенсивности отраженного излучения.

Чтобы найти, насколько может возрасти интенсивность отраженного импульса, необходимо знать коэффициент отражения света от зеркала. Подобный вопрос не возникает в случае покоящихся зеркал, которые сделаны из стекла (с наносенным тонким отражающим слоем — амальгамой) или металла: для них коэффициент отражения близок к единице. Однако пытаться ускорить такое макроскопическое зеркало до релятивистской скорости нереально, поскольку для этого все составляющие его атомы должны двигаться со скоростью, близкой к скорости света, т.е. иметь энергию больше нескольких гигаэлектронвольт на нуклон, что потребовало бы слишком большой энергии гипотетического ускорителя. Более реалистичным представляется ускорение микроскопически тонких электронных слоев. Напомним, что электрон становится релятивистским при энергиях порядка половины мегаэлектронвольта (что в 2 тыс. раз меньше, чем для нуклона). В связи с этим возникает ряд вопросов, среди которых наиболее важны вопросы о механизме ускорения тонких электронных слоев и о коэффициенте отражения элект-

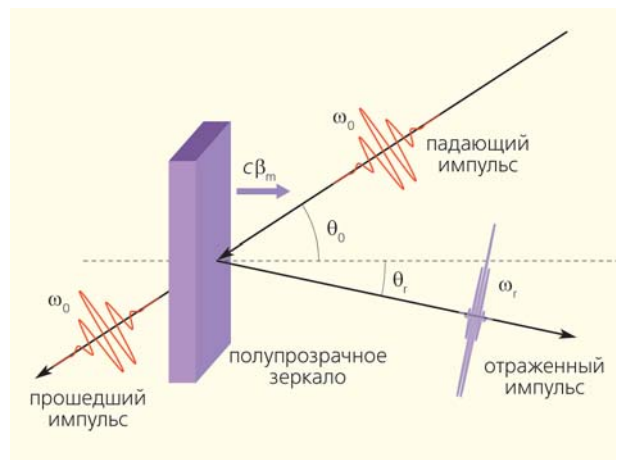


Рис.2. Отражение электромагнитного импульса от полупрозрачного зеркала, движущегося со скоростью  $c\beta_m$ . Прошедший сквозь зеркало импульс имеет ту же частоту и длину, что и падающий на зеркало. У отраженного от зеркала импульса частота выше (длина волны  $\lambda_r = 2\pi c/\omega_r$ , короче), а длина меньше, чем у падающего на зеркало. Угол отражения волн  $\theta_r$  не равен углу падения  $\theta_0$ . Отраженная волна распространяется вдоль направления, более близкого к нормали к зеркалу, чем падающая, т.е.  $\theta_r/\theta_0 < 1$ .

ромагнитной волны от ускоренного до релятивистской энергии электронного слоя.

Что касается ускорения тонкого электронного слоя, хорошо известно: сильное лазерное излучение, взаимодействуя с плазмой, способно привести к генерации электронов релятивистской энергии. В общем случае электронные потоки про-

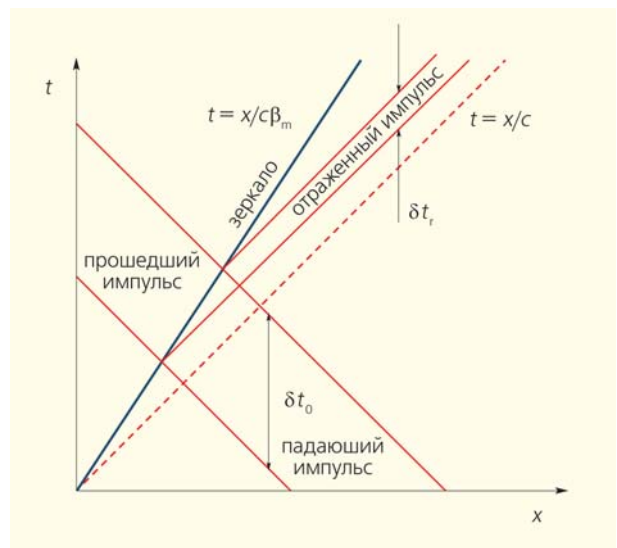


Рис.3. Отражение электромагнитного импульса от полупрозрачного зеркала в случае нормального падения. На плоскости  $(x, t)$  траектория зеркала описывается прямой  $t = x/c\beta_m$ . Мировые линии световых пучков заданы прямыми  $t = \pm x/c + \text{const}$ .

странственно неоднородны и могут иметь форму тонких плотных слоев. Поскольку в типичных условиях их толщина мала (менее 1 мкм), поверхностная плотность электронов в них недостаточно велика, чтобы обеспечить полное отражение падающей на слой лазерной электромагнитной волны. Тем не менее малая, но не слишком малая, отражательная способность тонкого электронного слоя может сделать его приемлемым кандидатом на роль релятивистского зеркала.

В качестве релятивистских зеркал можно использовать те тонкие плотные слои электронов, что формируются в нелинейных кильватерных плазменных волнах. Фазовая скорость кильватерной волны равна групповой скорости лазерного импульса, которая в плазме достаточно малой плотности приближается к скорости света в вакууме. Таким образом, модуляции плотности электронов в волне также бегут со скоростью, близкой к скорости света. Это удовлетворяет первому из требований, предъявляемых к кандидатам на роль релятивистского зеркала. Что касается второго требования — к заметной отражательной способности зеркала, то для выяснения его выполнения необходим дополнительный анализ. Дело в том, что в плазменной волне малой амплитуды изменение плотности электронов также мало по сравнению со значением критической концентрации, и ее профиль описывается функцией, плавной на масштабе длины волны лазерного излучения. В этих условиях хорошо выполняется приближение геометрической оптики, согласно которому

отражение света от максимумов плотности электронов в волне экспоненциально мало. Ситуация изменяется с ростом амплитуды волны и вступлением в игру нелинейных эффектов. Наиболее важным нелинейным эффектом в контексте обсуждаемой темы оказывается опрокидывание волны. Процесс опрокидывания объясняется тем, что скорость частиц в максимуме волны больше, чем в ее основании. Благодаря этому максимум движется быстрее, обгоняя основание, что приводит к «укручению» профиля волны. Все видели подобное опрокидывание на примере волн на воде, которое проявляется по-разному для набегающих на берег волн и для волн вдали от берега. В зоне прибой набегающая волна, опрокидываясь, разрушается на расстоянии порядка длины волны. А опрокидывание волны вдали от берега обычно приводит только к заострению ее вершины и образованию барашков. В такой фазе волна может находиться в течение достаточно длительного времени, которое существенно превышает ее период.

В нелинейных плазменных волнах вблизи порога опрокидывания распределение электронной плотности вдоль координаты  $x$  имеет вид каспа (от англ. cusp — заострение), который изображен на рис.4. Вблизи особенности плотность электронов обратно пропорциональна переменной  $\zeta$  в степени  $2/3$ , т.е.  $n_e \propto \zeta^{-2/3}$ . Здесь переменная  $\zeta$  представляет собой координату  $\zeta = x - v_{ph}t$ , бегущую со скоростью  $v_{ph}$ , равной фазовой скорости кильватерной волны. Такого рода особенность в профиле электронной плотности, вследствие нарушения условий применимости геометрической оптики, обеспечивает хотя и малое, но не экспоненциально малое, значение коэффициента отражения. Вычисление коэффициента отражения дает для него выражение  $R = |\rho|^2 \approx 1/\gamma_m^4$ .

### И как при этом усиливается

В силу релятивистских эффектов электронные слои имеют форму параболоидов, отвечающих обсуждавшейся выше каверне в электронной плотности. Причина формирования параболоидов связана с релятивистской зависимостью массы электронов от их энергии. Кильватерная плазменная волна имеет максимальную амплитуду на оси, а ближе к периферии волны амплитуда спадает. Поэтому время отклика (период волны) на оси больше, чем на некотором расстоянии от нее. Вследствие этого длина волны, приблизительно равная произведению скорости света на период, оказывается большей тоже на оси. В результате поверхности равной фазы, которые характеризуют форму волны, принимают параболоидальный вид. Тонкие параболоиды движутся со скоростью кильватерной волны, т.е. для отраженного излучения представляют собой релятивистские фокусирующие зеркала, как показано на рис.5.

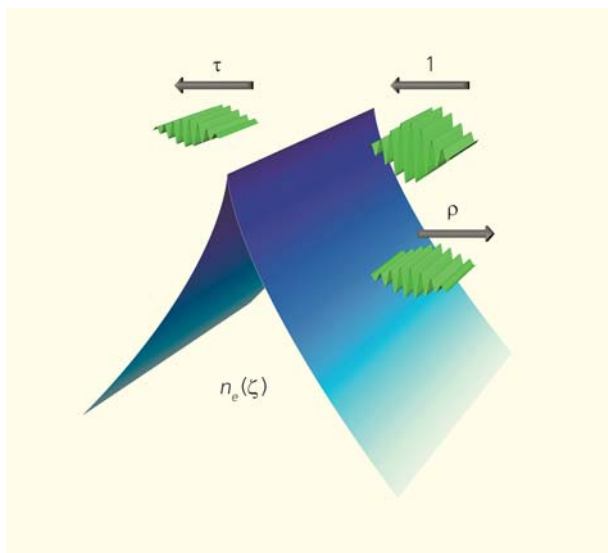


Рис.4. Схематическое изображение особенности в распределении электронной плотности в опрокидывающейся кильватерной волне, которая имеет вид каспа:  $n_e \propto \zeta^{-2/3}$ , где  $\zeta = x - v_{ph}t$  — бегущая координата. Падающая волна единичной амплитуды разделяется на прошедшую и отраженную волны с амплитудами  $\tau$  и  $\rho$  соответственно (при этом  $|\tau|^2 + |\rho|^2 = 1$ ).

Отражение от релятивистского параболического зеркала приводит к фокусировке излучения в фокусное пятно с поперечным размером, намного меньшим длины волны падающего излучения. Напомним, что при заданной мощности излучения его максимальная интенсивность достигается при фокусировке в область с минимальным размером, который приблизительно равен длине волны излучения. Поэтому повышение частоты, которое эквивалентно укорочению длины волны, открывает возможности для интенсификации электромагнитного излучения. Фокусная область, схематически показанная на рис.5, имеет вид тонкого диска с отношением продольного размера к поперечному порядка  $1/2\gamma_m$ . Меньший размер определяется минимальной длиной волны, которая относится к приосевой части светового пучка с  $\theta_0 \approx 0$  и для которой, согласно формуле (1), имеем  $\lambda_r \approx \lambda_0/4\gamma_m^2$ . В поперечном направлении структура фокусной области формируется лучами света на периферии пучка, и ее размер оказывается порядка  $\lambda_0/2\gamma_m$ , т.е. пучок фокусируется в пятно размером, существенно меньшим длины волны исходного электромагнитного излучения.

Принимая во внимание найденные выше соотношения, получаем: продольное и поперечное сжатие импульса обеспечивает его интенсификацию в  $(D/\lambda_0)^2\gamma_m^2$  раз, что существенно превышает единицу, несмотря на малость коэффициента отражения. Здесь  $D$  равно поперечному размеру падающего на зеркало электромагнитного пучка.

Возможность создания релятивистских зеркал в лазерной плазме была продемонстрирована экспериментально в Оптическом институте Японского агентства атомной энергии (JAEA), который расположен в префектуре Киото. В результате была обнаружена генерация фотонов с энергией в рентгеновском диапазоне с узким энергетическим спектром. Фактор повышения частоты лазерного излучения составил величину порядка 100.

В этих экспериментах два фемтосекундных пучка лазерного излучения мощностью в несколько тераватт фокусировались в тонкую газовую струю. Газ (гелий) быстро ионизовался. Один — более мощный — лазерный импульс возбуждал в плазме кильватерные волны, а другой — менее мощный, но более широкий — сталкивался с этими волнами. Энергия и количество отраженных фотонов измерялись с помощью ПЗС-камеры\*. Фотоны в падающем на релятивистское зеркало пучке имели энергию порядка одного электронвольта. В отраженном пучке их измеренная энергия была в диапазоне от 60 до 110 эВ. Количество отраженных фотонов соответствовало отражательной способности нелинейной плазменной волны, которую предсказывает теория при параметрах данного эксперимента.

\* Приборы с зарядовой связью (ПЗС) широко используются в науке и технике. Самые известные применения ПЗС относятся к цифровым фото- и видеокамерам.

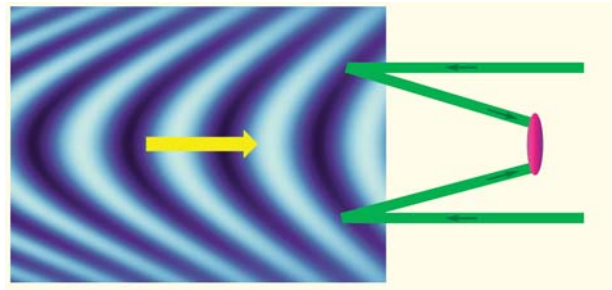


Рис.5. Схематическое изображение отражения и фокусировки пучков света движущейся навстречу кильватерной плазменной волной.

### Где пригодятся такие импульсы

В качестве одного из примеров потенциального применения концепции релятивистского зеркала укажем на поляризацию вакуума. Нелинейная зависимость показателя преломления вакуума от амплитуды электромагнитной волны  $E_{las}$  должна приводить к явлению двулучепреломления, к рассеянию фотона на фотоне и другим процессам. Нелинейность показателя преломления среды,  $n = n_0 + \lambda_0 K |E_{las}|^2$ , характеризуется постоянной Керра  $K = 7\alpha\lambda_c^3/90\pi m_e c^2 \lambda_0$ . Для длины волны излучения порядка 1 мкм она приблизительно равна  $10^{-27}$  см<sup>2</sup>/эрг. Вследствие нелинейных эффектов квантовой электродинамики распространяющиеся навстречу друг другу электромагнитные волны взаимно фокусируются. Используя выражение для постоянной Керра, найдем пороговое для взаимной фокусировки значение мощности излучения  $P_c = cE_{las}^2 D^2/4\pi$  ( $D$  — поперечный размер электромагнитного пучка), равное  $P_c = (90/28)cE_{qed}\lambda_0^2/\alpha$ . Для  $\lambda \approx 1$  мкм это дает  $P_c \approx 2.5 \cdot 10^{24}$  Вт. Принимая во внимание то, что длина волны отраженного от зеркала излучения в  $4\gamma_m^2$  раз короче, а мощность излучения возрастает в  $2\gamma_m$  раз, найдем, что поляризацию вакуума можно будет наблюдать, используя лазеры мощностью в 100 ПВт. Сейчас во многих лазерных центрах работают над созданием установок с такой мощностью.

Существуют и другие модели релятивистских зеркал в лазерной плазме, такие как сферические волны, тонкие электронные слои вблизи поверхности мишеней и ионно-электронные слои, ускоряемые лазерным излучением. В последнем случае кроме повышения основной частоты лазера происходит генерация гармоник высокого порядка (они обсуждаются ниже), частота которых сдвинута в область больших значений вследствие релятивистского движения источника.

Дальнейшее развитие теории и проведение экспериментов с использованием лазерных установок большой энергии проложит путь к созданию высокоэффективных источников когерентного рентгеновского излучения высокой мощности, основанных на концепции релятивистского зеркала.

## Польза высоких гармоник

В экспериментах по изучению взаимодействия лазерных импульсов с веществом достаточно часто наблюдается когерентное высокочастотное излучение. Обычно оно имеет вид гармоник высокого порядка, т.е. в спектре электромагнитной волны кроме частоты лазерного излучения  $\omega_0$  содержатся частоты  $3\omega_0, 5\omega_0, (2n + 1)\omega_0, \dots$ . Интерес к высоким гармоникам проистекает из возможности их использования для получения ультракоротких рентгеновских импульсов, пригодных для применения в биологии и медицине, в частности для расшифровки структур макромолекул. Механизмом генерации таких гармоник может служить нелинейная поляризация атомов и молекул облучаемой мишени. Однако этот механизм имеет естественный предел по интенсивности, налагаемый начинающейся на определенном ее уровне ионизацией атомов. В релятивистском пределе нелинейные процессы иного типа в полностью ионизованной плазме также могут приводить к появлению гармоник высокого порядка. В этом случае связанного с ионизацией ограничения на интенсивность высокочастотного излучения нет, поскольку вещество уже полностью ионизовано.

Фундаментальный механизм генерации релятивистских гармоник проявляется при когерентном взаимодействии электромагнитной волны с модуляциями электронной плотности, наведенными сильными падающим на неоднородную плазму излучением. Подобного рода модуляции представляют собой тонкие плотные осциллирующие электронные слои. Взаимодействие электромагнитного поля с такими слоями может рассматриваться как отражение от осциллирующего зеркала. Так же, как и в обсуждавшемся выше отражении от релятивистского зеркала, движущегося с постоянной скоростью, в этом случае двойной эффект Доплера снова приводит к распространению спектра отраженной волны в область высоких частот. Поскольку в течение одной половины периода колебаний волна отражается от зеркала, движущегося навстречу, а в течение второй половины периода взаимодействие происходит с удаляющимся зеркалом, частота отраженного излучения как повышается, так и понижается. В результате его спектр обогащается гармониками. Этот механизм генерации релятивистских гармоник называется механизмом релятивистского осциллирующего зеркала (подробное теоретическое описание лежащих в его основе нелинейных процессов можно найти в обзорной статье [3]).

При наклонном падении электромагнитной волны на неоднородную плазму нелинейные процессы в первую очередь развиваются в области, где частота волны оказывается равной локальному значению плазменной частоты, т.е. в области плазменного резонанса, где  $\omega_0 = \omega_{pi}(x)$ . Вследствие резонанса между волной и плазменными колебания-

ми здесь происходит локальное усиление электромагнитного поля [7]. Известные фазовые свойства вынужденных колебаний вблизи резонанса приводят к тому, что модуляции электронной плотности принимают вид возникающих и исчезающих электронных слоев, движущихся в сторону убывающей плотности плазмы. Иначе говоря, здесь периодически появляются и исчезают плазменные зеркала. Отраженная от них электромагнитная волна содержит ультракороткие импульсы большой амплитуды. Этот процесс проиллюстрирован на рис.6.

Длительность каждого из отраженных импульсов приблизительно равна  $\Delta T = \pi / \omega_0 \gamma_m^2$ , где релятивистский гамма-фактор  $\gamma_m$  определяется скоростью зеркала, т.е. для больших значений гамма-фактора импульс оказывается существенно короче длины волны лазерного излучения. Чтобы получить картины дифракции от макромолекул, используя такие электромагнитные импульсы, необходимая энергия фотонов должна быть в рентгеновском диапазоне ( $\sim 10$  кэВ). Этому отвечает значение релятивистского гамма-фактора порядка 50, что может быть достигнуто с лазерными импульсами интенсивностью  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>. Существующие в настоящее время лазерные установки позволяют получить излучение с такой интенсивностью.

Экспериментальное и теоретическое исследование релятивистских гармоник высокого порядка, генерируемых при взаимодействии мощного лазерного излучения с различными мишенями, представляет собой одну из основных задач в работе ведущих научных групп, которые специализируются в области изучения релятивистской лазерной плазмы.

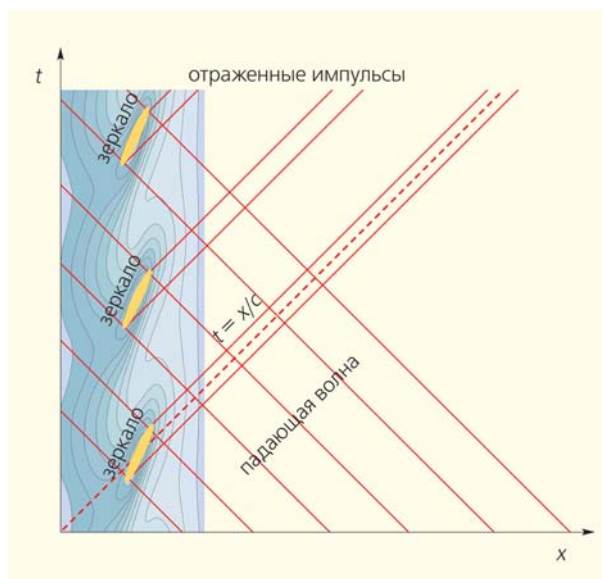


Рис.6. Генерация ультракоротких электромагнитных импульсов в процессе отражения волны от периодически возникающих и исчезающих плазменных зеркал.

## Когда зеркало убегает

При отражении сильной электромагнитной волны тонким плазменным слоем, состоящим из электронов и ионов, импульс волны передается электронам, поскольку их масса намного меньше, чем масса ионов. Из-за этого электроны, смещаясь относительно ионов, создают локально не скомпенсированный электрический заряд, что приводит к образованию узкой области с сильным электрическим полем. Данное электрическое поле и ускоряет ионы. Так радиационное давление света, действуя на электроны, передается ионам (иногда для краткости говорят о радиационном ускорении ионов).

Можно проследить связь между основными свойствами механизма радиационного ускорения ионов и классическими экспериментами П.Н.Лебедева по измерению давления света, а также идеями В.И.Векслера по коллективным методам ускорения заряженных частиц. К настоящему времени в Лаборатории имени Э.Резерфорда (Великобритания) и в Университете Кванджу (Южная Корея) были проведены эксперименты, которые продемонстрировали такой механизм ускорения ионов. Достичь значения параметров, при которых он обладает высокой эффективностью, позволит уже в ближайшем будущем создание и применение лазеров большей мощности: лазерная техника, основу которой когда-то заложили А.М.Прохоров и его коллеги и в развитии которой Александр Михайлович вложил немало сил, продолжает идти вперед семимильными шагами.

Механизм радиационного ускорения ионов реализуется в условиях, когда лазерный импульс может вызывать движение тонкого плазменного слоя как целого. Очевидна аналогия между этим процессом и передачей импульса от электромагнитной волны убегающему (движущемуся в том же направлении, что и волна) релятивистскому зеркалу, роль которого здесь играет непрозрачная

для излучения тонкая плазменная мишень. В результате, вследствие двойного эффекта Доплера, у отраженного электромагнитного импульса частота и энергия ниже, чем у исходного падающего на зеркало излучения. Это формально следует из формулы (1) для отрицательных значений скорости  $\beta_m$ . Из нее следует, что частота отраженного света в отношении  $(1 - \beta_m)/(1 + \beta_m)$  меньше (приблизительно в  $4\gamma_m^2$  раз), чем частота падающего на зеркало излучения. Соответственно, энергия отраженных фотонов  $\hbar\omega_i$  и энергия отраженной волны уменьшаются с таким же множителем. Энергия отраженного электромагнитного импульса при этом равна  $\mathcal{E}_{\text{las}}(1 - \beta_m)/(1 + \beta_m)$ , где  $\mathcal{E}_{\text{las}}$  — энергия падающего на зеркало лазерного импульса. Отсюда следует, что передаваемая мишени энергия равна  $2\mathcal{E}_{\text{las}}\beta_m/(1 + \beta_m)$ . В ультрарелятивистском пределе, когда  $\beta_m \rightarrow 1$ , практически вся энергия лазерного излучения передается ускоренным ионам. В общем случае энергия  $\mathcal{E}_i$ , приходящаяся на один ион, определяется полным числом ускоренных ионов  $N_{\text{tot}}$  и энергией лазерного импульса. В ультрарелятивистском пределе имеем  $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\text{las}}/N_{\text{tot}}$ , т.е. лазерный импульс с энергией 1 кДж сможет ускорить  $10^{11}$  протонов до энергии 100 ГэВ на протон.

\* \* \*

Итак, в рамках концепции релятивистского зеркала становится возможным создание компактных источников когерентных импульсов рентгеновского диапазона, обладающих малой длительностью и высокой яркостью, а также компактных ускорителей ионов высоких энергий. Эта концепция существенным образом расширяет область приложений, требующих большого числа фотонов в коротком импульсе и большого числа ионов высокой энергии. В будущем она найдет и другие сферы применения, включающие лабораторную астрофизику [8], ядерную физику [9] и другие области, относящиеся к фундаментальной физике [8]. ■

## Литература

1. Горбунов Л.М. Зачем нужны сверхмощные лазерные импульсы? // Природа. 2007. №4. С.11–20.
2. Vamber C., Boege S.J., Koffas T. et al. Studies of nonlinear QED in collisions of 46.6 GeV electrons with intense laser pulses // Phys. Rev. D. 1999. V.60. P.092004–1–43.
3. Буланов С.В., Есиркепов Т.Ж., Кандо М. и др. Релятивистские зеркала в плазме — новые результаты и перспективы // УФН. 2013. Т.183. С.449–486.
4. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся сред. // Собрание научных трудов. Т.1: Работы по теории относительности. 1905–1920. М., 1965. С.7–35.
5. Гриб А.А., Мамаев С.Г., Мостепененко В.М. Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях. М., 1988.
6. Leemans W., Gonsalves A.J., Mao H.-S. et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime // Phys. Rev. Lett. 2014. V.113. P.245002–1–4.
7. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., 1967.
8. Bulanov S.V., Esirkepov T.Zh., Kando M. et al. On the problems of relativistic laboratory astrophysics and fundamental physics with super powerful lasers // Физика плазмы. 2015. Т.41. С.351.
9. Nisbiuchi M., Sakaki H., Esirkepov T.Zh. et al. Towards a novel laser-driven method of exotic nuclei extraction-acceleration for fundamental physics and technology // Физика плазмы. 2016. Т.42. С.331–341.

# Лазеры — зрению

С.К.Вартапетов, И.А.Щербаков

Первой отраслью медицины, в которой нашли применение лазеры, стала офтальмология. Глаз, будучи оптической системой, оказался идеальным объектом для бесконтактного воздействия лазерного луча. Лазерная микрохирургия глаза имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными механическими манипуляциями: отсутствие прямого контакта инструмента с тканью, стерильность в ходе самой операции и стерилизующее воздействие лазерного излучения на ткани; выполнение хирургических процедур внутри глаза без его вскрытия; возможность доставки излучения внутрь глаза с помощью волоконно-оптических систем; избирательное действие и точная дозировка воздействия на ткани — от коагуляции тканей до их абляции и разреза.

В офтальмологии эпоха лазерных операций отсчитывается от 1968 г., когда аргоновый лазер с длиной волны 531 нм был использован для коагуляции отслоившейся сетчатки. «Приваривание» сетчатки и в настоящее время — один из самых отработанных и широко практикуемых методов лазерного вмешательства. Впоследствии аргоновый лазер был заменен на более современный — с диодной накачкой. Другое заболевание глаза, при котором активно используется излучение лазера, — глаукома, характеризующаяся накоплением жидкости в глазу. Лазер играет роль своеобразной иглы, обеспечивая создание каналов

© Вартапетов С.К., Щербаков И.А., 2016



**Сергей Каренович Вартапетов**, кандидат физико-математических наук, директор Центра физического приборостроения ИОФ РАН. Область научных интересов — газовые и твердотельные лазеры, лазерные технологические системы, медицинские лазерные системы.



**Иван Александрович Щербаков**, академик, академик-секретарь Отделения физических наук РАН, профессор, доктор физико-математических наук, директор ИОФ РАН, заведующий кафедрой лазерной физики Московского физико-технического института. Награжден золотой медалью имени А.М.Прохорова РАН (2013). Занимается лазерной физикой, спектроскопией, нелинейной и квантовой оптикой, медицинскими лазерами.

**Ключевые слова:** офтальмология, рефракционная хирургия, лазер.  
**Key words:** ophthalmology, refractive surgery, laser.

для оттока жидкости. Но самое широкое применение лазерная микрохирургия нашла в коррекции рефракции. Оптическая сила глаза как линзы (т.е. величина, обратная фокусному расстоянию) в основном (более чем на 70%) определяется кривизной роговицы. Следовательно, изменяя форму последней, можно влиять на рефрактивные характеристики зрения. Об использовании лазеров для этой цели мы и расскажем подробнее.

## Средства и методы

Оптimalен для абляции роговицы, как было установлено в работе [1], эксимерный ArF-лазер с длиной волны 193 нм. Тут необходимо сделать небольшое отступление и напомнить, что эксимерные лазеры — это газовые лазеры, излучение которых возбуждается элект-



рическим разрядом или электронным пучком. Идея о возможности генерации молекулярными соединениями, существующими только в возбужденном состоянии\* (что и определило название лазера — *excited dimer*, сокращенно *excimer*), была впервые высказана и реализована в 1971 г. группой ученых из Физического института имени П.Н.Лебедева, возглавляемой Н.Г.Басовым. А первый коммерческий эксимерный лазер был создан в СССР в 1984 г. под руководством А.М.Прохорова в Центре физического приборостроения Института общей физики.

Эксимерные лазеры генерируют излучение в УФ-области спектра (193–350 нм) и имеют чрезвычайно высокий коэффициент усиления, что делает их не совсем классическими: излучение формируется в оптическом резонаторе за счет всего нескольких проходов. Это, в свою очередь, приводит к генерации коротких импульсов (их характерная длительность  $\approx 10$ – $20$  нс, что соответствует трем-четырем прохождениям по резонатору длиной  $\sim 100$  см), а также к тому, что излучение не имеет классической модовой структуры. Форма выходного пучка эксимерных лазеров, как правило, прямоугольная, а пространственное распределение интенсивности в пучке неоднородное. Эти «недостатки» эксимерного лазера с лихвой компенсируются тем, что только эксимерные лазеры позволяют генерировать мощное излучение в УФ-области спектра.

Коротковолновое излучение ArF-лазера с энергией кванта 6.4 эВ, воздействуя на роговицу, приводит (при минимальном термическом воздействии!) к прямой фотодиссоциации роговичной ткани с образованием микро- и нанометровых фрагментов. Эти фрагменты аблируют (т.е. испаряются) с поверхности с очень высокими, практически сверхзвуковыми, скоростями.

Луч эксимерного ArF-лазера действует на роговицу поистине ювелирно: глубина поглощения излучения составляет  $\approx 0.2$  мкм при плотности энергии в импульсе 160 мДж/см<sup>2</sup>. Процесс фотодиссоциации носит пороговый характер — фотодиссоциация роговицы начинается только после превышения энергетического порога ( $\sim 40$  мДж/см<sup>2</sup>).

Технология коррекции зрения основана на профилировании наружной поверхности роговицы. Если ткань удаляется в центральной зоне, роговица становится более плоской, что исправляет близорукость. Если же испарить периферическую

часть роговицы, то ее центр получится более «крутым», что позволяет корригировать дальнюю зоркость. Дозированное удаление в разных меридианах роговицы дает возможность избавиться от астигматизма.

Роговица имеет толщину около 600 мкм и состоит из пяти слоев: наружного (эпителия), боуменовой мембраны, стромы, десцеметовой мембраны и внутреннего (эндотелия). Основной объем, около 500 мкм, приходится на строму (рис.1).

При лазерной коррекции удаляется часть стромы в оптической зоне глаза, т.е. в той части, с которой свет попадает в зрачок и формирует изображение на сетчатке. В общем случае толщина испаренного слоя роговицы  $b$  для достижения рефракционного эффекта  $\delta D$  (в диоптриях  $D$ ) связана с диаметром оптической зоны  $OZ$  следующим соотношением:  $b$  (мкм) =  $[(\delta D)/3] \times OZ^2$  (мм). Так, для оптической зоны 6 мм нужно удалить 12 мкм роговицы при коррекции зрения на одну диоптрию. Вообще операция по лечению регулярной рефракционной патологии считается успешной, если некорригированная острота зрения после нее не хуже или выше дооперационной максимально корригированной остроты зрения. Иными словами, если пациент в очках имел остроту зрения 1.0, то после операции она без очков должна быть 1.0 или выше. Напомним, что острота зрения 1 соответствует возможности глаза различать объекты с угловым расстоянием между ними в одну угловую минуту.

Современная коррекция зрения методом лазерной абляции роговицы реализована несколькими способами. Основные методики — это фоторефрактивная кератэктомия (ФРК), трансэпителиальная ФРК, лазерный кератомилез *in situ* (ЛАСИК/LASIK — Laser-Assisted *in Situ* Keratomileusis), Фемто-ЛАСИК.

Смысл ФРК заключается в испарении склеры в оптической зоне для изменения ее кривизны и, соответственно, оптических свойств. При этом

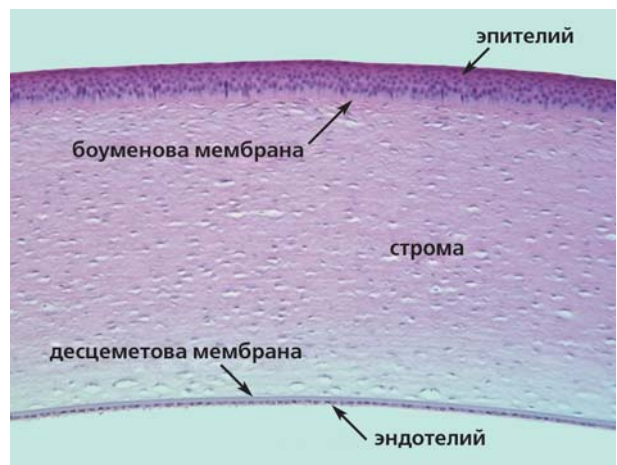


Рис.1. Схема строения роговицы человеческого глаза.

\* У таких молекул есть только «притягивающее» (связывающее) возбужденное состояние и «отталкивающее» (несвязывающее) основное. В возбужденном состоянии (например, вызванном электрическим разрядом) молекулы (димеры) образовываться могут, причем автоматически с инверсной населенностью уровней, но, когда лишняя энергия «сброшена» в виде спонтанного или вынужденного излучения, основное состояние не способно удержать атомы вместе и происходит очень быстрый (в течение пикосекунд) распад.

эпителий удаляется либо механическим способом, либо непосредственно лазером (транспэпителиальная ФРК).

По технологии ЛАСИК эпителий вместе со слезной стромой общей толщиной 120–160 мкм удаляется лишь временно, а лазер воздействует непосредственно на строму роговицы. Операция состоит из двух этапов. На первом этапе создается роговичный клапан (лоскут) (строма + эпителий) с характерным диаметром 10 мм и толщиной 120 мкм. Клапан создается либо механическим инструментом (микрокератомами различной конструкции с применением электрического или пневматического привода), либо по новой технологии с использованием фемтосекундного лазера (ФемтоЛАСИК). Далее получившийся лоскут специальным инструментом отделяется от основной части роговицы так, чтобы он не закрывал оптическую зону. На втором этапе операции роговица пациента подвергается воздействию эксимерного лазера, с помощью которого формируется требуемая кривизна поверхности, после чего роговичный клапан возвращается на место. Поскольку в данном случае нет необходимости удалять внешний слой эпителия, реабилитация после лазерной операции существенно ускоряется.

Формирование роговичного лоскута с помощью фемтосекундного лазера предпочтительнее, поскольку воздействие на роговицу происходит на заданной глубине, а все слои роговицы, включая эпителий, вне зоны фокусировки лазерного излучения остаются незатронутыми. Толщина лоскута здесь получается более равномерной, чем при обычном ЛАСИKe, поверхность раздела более гладкой, а сам лоскут может быть сделан тоньше 90 мкм, что существенно при проведении операций пациентам с тонкой роговицей.

Первые коммерческие эксимерные офтальмохирургические установки использовали лазеры с большой энергией в импульсе (200–400 мДж) и с пучками, характерные размеры которых равны диаметру области обработки оптической зоны роговицы ( $\leq 9$  мм). Профиль интенсивности на роговице глаза формировался профилированными вращающимися или сменными диафрагмами. В первой такой российской установке [2] была воплощена оригинальная оптическая схема с применением гауссова гомогенизатора пучков (об этом подробнее будет сказано ниже). Такой метод формирования обеспечивал совершенно гладкую послеоперационную поверхность роговицы. Однако технические возможности при работе с широкоапертурными пучками существенно ограничены при коррекции дальности зрения и астигматизма. Позже было предложено\* формировать произвольную послеоперационную поверхность с помощью сканируемого по поверхности рого-

вицы лазерного пучка малого диаметра (размер лазерного пятна 0.7–1.2 мм). Такая технология известна как «летающее пятно» (Flying spot). При каждом импульсе ArF-лазера абляции подвергается малый (менее 1 мкм в толщину и менее 1 мм в диаметре) слой роговицы, что позволяет с большой точностью сформировать рассчитанную послеоперационную поверхность.

Самый современный тип лазерных офтальмохирургических операций — персонализированная коррекция зрения. Отличие ее от прежних методик состоит в том, что исправляются не только сфероастигматические отклонения от нормы, но и нерегулярные, уникальные для данного пациента рефракционные дефекты, которые не могут быть скорректированы подбором очков. Персонализированная коррекция осуществляется на основе данных кератометрии (измерения формы роговицы) и аберрометрии (измерения аберраций всего оптического тракта глаза). Из-за того что при таких операциях приходится наносить на роговицу более мелкие элементы рельефа, потребовался новый уровень точности и стабильности лазерной коррекции формы роговицы. В частности, необходимым элементом стала система слежения за движением глаза в ходе операции, вносящая соответствующие поправки в режиме реального времени. Ключевым параметром системы слежения служит ее латентный период — время от момента смещения глаза до учета этого смещения в ходе операции.

Человеческий глаз — очень динамичная структура, в которой протекает множество процессов различных пространственных и временных масштабов. Например, движения глаза в ходе операции должны рассматриваться во временном масштабе миллисекунд, тогда как послеоперационные адаптационные процессы могут занимать несколько месяцев. Каждый из этих процессов может оказать решающее влияние на качество послеоперационного зрения и потому должен быть учтен при проектировании офтальмохирургического оборудования. И разумеется, столь точные глазные операции невозможны без исчерпывающей исходной информации и контроля за результатами, для чего существует целый арсенал диагностических средств, которого мы коснемся вкратце.

## От начальных условий до проверки решения

Основные методы диагностики и послеоперационного контроля включают следующие процедуры.

*Определение субъективной рефракции* (ручной подбор очков) позволяет установить параметры коррекции регулярных искажений рефракции.

*Кератотопография (кератометрия)* выдает базовые выходные данные по форме (карте высот) наружной поверхности роговицы глаза,

\* Lin J.T., LaserSight Inc. Ophthalmic surgery method using non-contact scanning laser / US Patent 5520679.

на основе которой рассчитывается кривизна поверхности в каждой точке роговицы. Современные приборы для кератометрии основаны на анализе искажения отраженных от роговицы спроецированных на нее концентрических кругов. Таким образом, рефракционные свойства глубоких отделов глаза кератометрия никак не отражает.

*Аберрометрия* дает информацию об аберрациях, вызываемых не только дефектами роговицы, но и всем оптическим трактом глаза. Для измерения этих аберраций в точке пересечения оптической оси глаза и сетчатки формируется малоразмерный инфракрасный источник света, получаемый направлением узкого луча вдоль оптической оси глаза. Выходящий при этом из зрачка глаза волновой фронт (в виде разложения по полиномам Цернике [3]) и представляет собой искомые данные аберрометра. Если глаз, сфокусированный на бесконечно удаленный объект, покидает плоский волновой фронт, то в этом идеальном случае никакой оперативной коррекции не нужно.

Таким образом, аберрометрия дает не геометрические, а оптические данные, причем характеризующие не только роговицу, но и весь оптический тракт глаза в целом. Правда, область определения ее данных не выходит за пределы зрачка на момент измерения, тогда как данные кератометрии не имеют такого ограничения.

Успех операции — высокое качество послеоперационного зрения — зависит от многих факторов. Недостаточный учет даже одного из них может резко снизить качество жизни после операции. Перечислим важнейшие.

#### **Ограниченность толщины роговицы.**

Средняя толщина роговицы составляет 550 мкм, но может варьироваться в зависимости от расы, национальности, пола, возраста и т.д. В отличие от большинства тканей организма, роговица не регенерируется и потому является невозполнимым ресурсом. Слишком тонкая (менее 250–300 мкм) остаточная роговица может выпячиваться под воздействием внутриглазного давления. Поэтому при коррекции рефракционных аномалий высоких степеней следует планировать меры по экономии испаряемой роговицы.

**ЛАСИК-клапан и ФРК-эпителизация.** Эпителиально-роговичный лоскут (клапан), возвращаемый на место после операции ЛАСИК, и регенерация эпителия после ФРК-операций оказывают сглаживающее влияние на послеоперационную поверхность, что, с одной стороны, восстанавливает гладкость обработанной роговицы, но с другой — снижает точность формирования мелких деталей на роговице, уменьшая эффективность коррекции нерегулярных аномалий рефракции.

**Конечность размера лазерного пятна.** Из-за этого желаемая послеоперационная форма роговицы не может быть реализована с абсолютной точностью. Но уменьшение диаметра пятна вызывает увеличение числа импульсов лазера (обратно

пропорционально квадрату диаметра пятна), необходимых для операции, и удлинение самой операции, что нежелательно по клиническим соображениям.

**Интраоперационная температура роговицы.** Перегрев роговицы в ходе операции может вести к ухудшению ее оптических характеристик.

**Позиционирование операции относительно оптической оси глаза, торсионная ориентация.** Центр зоны операции должен совпадать с оптической осью глаза, а горизонтальная ось операции — с таковой в момент диагностических измерений. Это особенно важно при персонализированных операциях, в которых профиль абляции включает элементы небольшого размера.

**Подвижность и нестабильная выраженность анатомических структур глаза.** Геометрическая привязка (как сдвиговая, так и торсионная) производится по анатомическим структурам глаза — лимбу (границе между радужной оболочкой и склерой) и радужке. Вид лимба может зависеть от условий освещения, радужка может неодинаково и нерегулярно сокращаться во время диагностических измерений и в ходе операции.

**Стабильность энергии лазерного импульса.** Чем выше стабильность энергии лазерных импульсов, тем выше вероятность достижения заданных послеоперационных значений остроты зрения.

**Соотношение размеров зрачка глаза и зоны абляции.** Если зона абляции существенно меньше зрачка, качество зрения может резко снизиться. Особенно эта проблема актуальна для вечернего и ночного зрения, т.е. в условиях, когда зрачок расширен.

**Качество переходной зоны.** Такая зона — плавный переходный участок между частью поверхности роговицы, форму которой планируется изменить, и периферической зоной, которая не подвергается воздействию лазера. Эта зона должна обеспечивать, помимо математической гладкости, отсутствие высоких значений первых и вторых пространственных производных профиля абляции в пределах всей области действия лазера. Наличие резких изломов и врезов приведет к нестабильным результатам операции, так как будет вызывать физиологическое сглаживание профиля абляции, которое при ЛАСИК-операциях происходит за счет действия клапана, а при ФРК — за счет избыточного наращивания роговичного эпителия.

**Возможность внезапного прерывания операции.** В случае резких изменений самочувствия пациента операция должна быть остановлена. Это редкое, но не исключительное событие. Поэтому важно производить абляцию в такой последовательности, чтобы в случае прерывания операции пациент не остался с роговицей, имеющей неправильную форму, что затруднило бы завершение оперативного лечения.

## Работают эксимерные лазеры

Уже спустя несколько лет после предложения американских ученых использовать эксимерный лазер для коррекции зрения [1], в 1987–1988 гг., в Германии, США и Советском Союзе (в Межотраслевом научно-техническом комплексе «Микрохирургия глаза» — МНТК МГ) были проведены первые клинические фоторефрактивные операции.

В МНТК МГ в 1986 г. была создана не имеющая аналогов в мире эксимер-лазерная офтальмологическая установка «Профиль» с уникальной системой формирования гауссова профиля излучения. Гауссов профиль сначала формировался за счет прохождения излучения через кювету, образованную плоским и сферическими окнами и наполненную поглощающим газом. Впоследствии газовая кювета была заменена оптическим гомогенизатором на основе шероховатой кварцевой пластины. При гауссовом профиле интенсивности излучения, воздействующего на глаз, автоматически формировалась параболическая форма роговицы, что в оптике соответствует безаберрационной оптической поверхности. Данный принцип лег в основу первой отечественной коммерческой системы «Профиль-500» (рис.2), разработанной в 1995 г. совместно Центром физического приборостроения Института общей физики РАН (ЦФП ИОФ РАН), носящего в настоящее время имя академика А.М.Прохорова, и Межотраслевым научно-техническим комплексом «Микрохирургия глаза», носящим ныне имя академика С.Н.Федорова.

Именно Святослав Николаевич Федоров и Александр Михайлович Прохоров были инициатора-

ми разработки и производства в России коммерческих систем для рефракционной хирургии. В последующем оба коллектива вместе создали для такой хирургии несколько поколений эксимерных лазерных систем, которые были уже основаны на принципе «летающего пятна». В системе последнего поколения «Микроскан Визум» (рис.3) обеспечен учет всех 10 перечисленных выше факторов, влияющих на качество проводимых операций.

Основные особенности системы «Микроскан Визум», которые определяют предсказуемость проведения операций и высокое качество послеоперационной остроты зрения в дневное и ночное время, состоят в следующем.

Обеспечена *высокая частота повторения импульсов*. Используется эксимерный лазер собственной разработки, излучающий импульсы с частотой повторения 500 Гц, что гарантирует малое время операции (5 с на 1 D).

Выбран *оптимальный размер лазерного пятна*. При математическом моделировании и в клинической практике были опробованы размеры лазерного пятна от 0.7 до 1.14 мм. Было установлено, что пятно размером 0.9 мм оказывается достаточно малым для качественного выполнения как стандартных, так и персонализированных операций. Если уменьшить данный параметр, это удлинит операцию, но существенно не повлияет на клинические результаты.

Оптимизирована *форма профиля энергии в лазерном пятне*. В силу особенности пространственной формы исходного импульса во всех зарубежных коммерческих системах излучение эксимерного лазера преобразуется системой гомогенизации и формируется гауссов профиль для сканирующего лазерного пучка. Наши исследования, однако, показали, что в сканирующих системах эффективнее работает пучок с практически плоским распределением интенсивности. Размер шероховатостей на роговице для «плоского» пучка получается в 2.3 раза меньше, чем для гауссова.

Реализована *высокая стабильность энергии лазерных импульсов*. Для предсказуемости и повторяемости результатов операции среднее квадратичное отклонение энергии в лазерных импульсах должно быть как можно меньше. Кратковременная нестабильность средней энергии лазерного излучения эксимерного лазера, характеризующая точность проводимой коррекции, у нас не превышает 1% (среднее квадратичное откло-



Рис 2. Эксимерная лазерная система «Профиль-500».

нение), что соответствует ошибке  $0.1 D$  при коррекции  $10.0 D$ .

Разработана *скоростная система слежения за положением глаза*. Как уже говорилось, глаз в ходе операции не может быть жестко фиксирован и потому непрерывно совершает быстрые неконтролируемые движения, как поступательные (амплитудой до нескольких миллиметров), так и торсионные (вращение глаза вокруг его оптической оси, амплитуда до десятков градусов). Эти движения требуют непрерывного автоматизированного отслеживания и внесения соответствующих поправок в ход операции, т.е. работы автоматической системы слежения. В установке «Микроскан Визум» реализована такая система, которая может отслеживать положение глаза по привязке либо к зрачку, либо к радужной оболочке или к лимбу (границе между радужной оболочкой и склерой). Латентное время системы слежения составляет менее 1 мкс.

Исключен *перегрев роговицы*. В ходе операции небольшая часть энергии лазерных импульсов переходит в тепло, что может вызвать патологические процессы (ожог, клеточные мутации). В установке реализован такой алгоритм сканирования лазерного пучка, при котором каждый следующий импульс направляется на роговицу на возможно большем расстоянии от предыдущего, что позволяет избежать накопления тепла и повышения температуры роговицы. Измеренное максимальное повышение температуры роговицы на частоте импульсов 500 Гц не превышает  $4^{\circ}\text{C}$  (до температуры менее  $35^{\circ}\text{C}$ ). Его можно считать физиологически безвредным.

В итоге установка демонстрирует отличные *клинические результаты по различным типам операций*. Вмешательства всех типов, описанных в данной работе, широко применяются в клинической практике. Всего на эксимер-лазерных установках серии «Микроскан» за 20 лет эксплуатации выполнено более 500 тысяч операций. Среднее отклонение достигнутых послеоперационных результатов от планируемых значений в диапазоне от  $-1.0$  до  $-8.0 D$  не превышает  $0.25 D$ .

## Подключаются фемтосекундные

По мере развития лазерной техники исследователи разрабатывали методы укорочения длительности лазерных импульсов. Прогресс в увеличении мощности лазера был достигнут в основном за счет сокращения длительности импульсов, а не увеличения самой энергии. Первые лазеры генерировали импульсы миллисекундного диапазона, а сейчас идет речь уже об импульсах длительностью в аттосекунды ( $10^{-18}$  с), что приближается к одному периоду колебаний световой волны! Даже незначительная энергия генерации, но сосредоточенная в столь коротком временном интер-



Рис.3. Экимерная лазерная система «Микроскан Визум».

вале, дает высокую интенсивность излучения. Так, в рассматриваемом здесь медицинском применении используется фемтосекундный лазер с энергией в импульсе около 2 мкДж при длительности около 200 фс, что при фокусировке излучения в пятно характерного диаметра около 2 мкм приводит к значению пиковой лазерной мощности более чем  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Вообще в настоящее время достаточно широкий класс фемтосекундных лазеров, твердотельных или волоконных, генерирует импульсы с энергией от единиц до сотен микроджоулей длительностью от единиц до сотен фемтосекунд. На их базе созданы уникальные системы с последующим усилением импульсов до интенсивности петаваттного уровня.

Первые эксперименты, в которых вещество обрабатывалось излучением фемтосекундных лазеров [4], показали практически полное отсутствие зоны теплового воздействия. В связи с этим такие лазеры могут быть эффективно использованы для прецизионной трехмерной обработки прозрачных материалов в микрометровых масштабах. Высокие интенсивности фемтосекундных импульсов приводят к сильному нелинейному многофотонному поглощению даже в материалах, прозрачных для используемых длин волн. В идеальном случае сфокусированный фемтосекундный импульс создает в объеме сферическую модификацию с диаметром в несколько микрометров (типично менее 2 мкм).

Такие особенности воздействия фемтосекундных импульсов, как возможность обработки внутриобъемных локальных областей без влияния на окружающие зоны, высокая степень локализации микромодификации и отсутствие зоны теплового

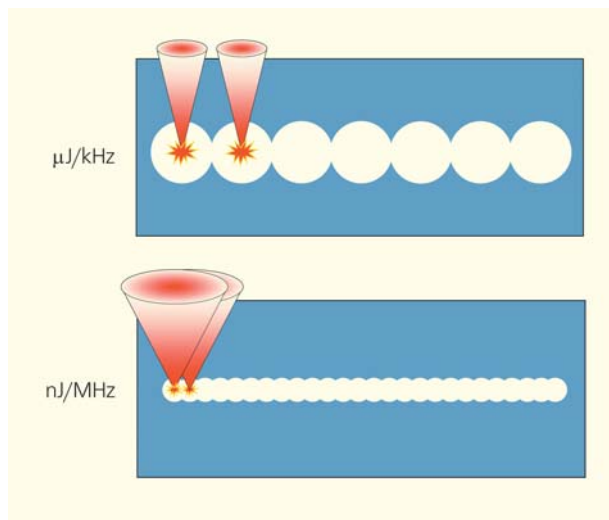


Рис.4. Два варианта формирования роговичных разрезов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов.

воздействия, становятся определяющими при их использовании в медицине, в частности в офтальмологии. Применение в офтальмологии фемтосекундных лазеров расширяется стремительно. Основой технологии служит внутривитреальная обработка роговицы, когда лазерный пучок остро фокусируется во внутренние слои роговицы и производится локальное их рассечение.

При этом возможны два подхода:

- использование лазера с относительной большой энергией в импульсе (более 1 мкДж) и относительно низкой частотой повторения (30–200 кГц), условно этот режим обозначается  $\mu\text{J}/\text{kHz}$ ;

- использование лазера с малой энергией в импульсе (менее 1 мкДж) и высокой частотой повторения (более 500 кГц) — так называемый режим  $\text{nJ}/\text{MHz}$ .

В зависимости от выбранного вида лазера и типа воздействия (нДж или мкДж) для реализации режима резания (расслоения) роговицы необходимы разные алгоритмы перемещения лазерного

фокального пятна во внутренних слоях роговицы. В силу специфики физических процессов, имеющих место при различных лазерных параметрах, результаты обработки сильно зависят как от пространственного расположения, так и от последовательности воздействия (кумулятивный эффект) на данную область биоматериала. На рис.4 схематично проиллюстрированы варианты такого взаимодействия и различия получаемых результатов — более узкий разрез и более гладкая конфигурация краев в случае  $\text{nJ}/\text{MHz}$ -режима с малым пятном фокусировки.

В настоящий момент фемтосекундные лазеры используются для большого количества операций различного типа (рис.5).

Прежде всего это уже упоминавшаяся операция Фемто-ЛАСИК (рис.5,а), в которой роговичный лоскут формируется как раз с помощью фемтосекундного лазера. Данный лоскут содержится в себе эпителий, который не подвергается воздействию лазера (уже эксимерного), что улучшает прогнозируемость результатов и послеоперационное восстановление.

Фемтосекундные лазеры незаменимы для формирования роговичных карманов (рис.5,б) и роговичных тоннелей (рис.5,в) в строме роговицы. При таком заболевании, как кератоконус, происходит истончение роговицы, уменьшение ее механической прочности, что, в свою очередь, приводит к существенной потере остроты зрения, вплоть до полной слепоты. Один из способов усиления механических свойств роговицы — введение внутрь нее специального укрепляющего раствора. Для этого с помощью фемтосекундного лазера в строме роговицы создается карман, в который раствор и вводится (такая операция называется «кросслинкинг»). Другой вариант: вне оптической зоны глаза создается роговичный тоннель, куда вставляются пластиковые укрепляющие кольца. Фемтосекундный лазер также используется для создания внутри стромы, на глубине около 300 мкм, небольших разрезов, ослабляющих механические характеристики роговицы в определенных направлениях, что

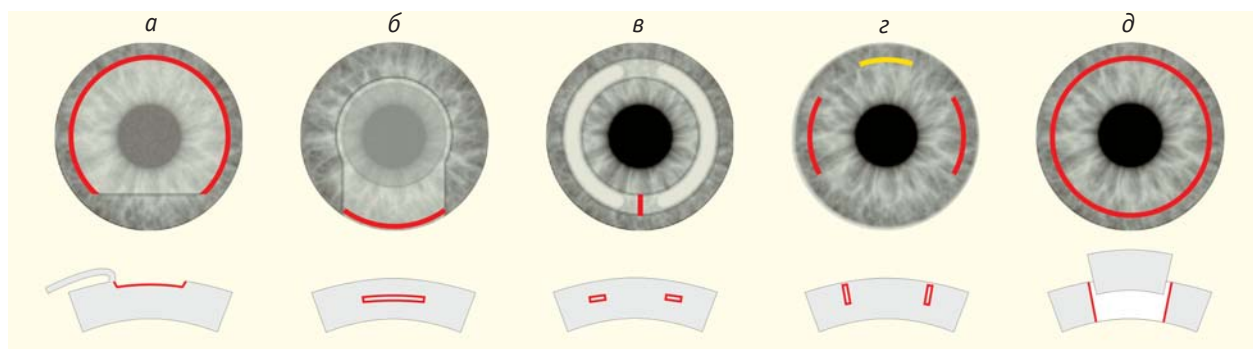


Рис.5. Примеры операций, доступных на офтальмологической установке «Фемто Визум» (дан вид на роговицу сверху и сбоку; желтым цветом показаны вертикальные надрезы, зеленым — горизонтальные): Фемто-ЛАСИК (а), роговичный карман (б), роговичный тоннель (в), дуговые послабляющие надрезы (г), кератопластика (д).

приводит к механической релаксации и корректировке астигматизма глаза (рис.5,з).

В принципе, с помощью только фемтосекундного лазера можно выполнять и полную коррекцию рефракции. При этом лазером в строме роговицы формируется лентикла с известной кривизной поверхностей, которая в дальнейшем извлекается через надрез в роговице. А для исправления астигматизма (или для доступа в переднюю камеру глаза) производятся проникающие и послабляющие надрезы роговицы. В данном случае лазер используется в качестве прецизионного хирургического ножа. При надрезе внутреннее давление глаза немного раскрывает края разреза, меняя таким образом кривизну роговицы в направлении, перпендикулярном ему.

Одна из самых распространенных операций в офтальмологии — замена хрусталика при катаракте. Излучение фемтосекундного лазера способно как разрушить помутневшее ядро хрусталика, так и осуществить капсулорексис, т.е. прецизионное вскрытие капсулы хрусталика для дальнейшего извлечения его ядра через получившееся окно, а также последующей надежной фиксации искусственного хрусталика в капсульном мешке.

С помощью фемтосекундного лазера производятся также операции по кератопластике (рис.5,д). Для пересадки роговицы требуется, чтобы донорский материал и пациент были прооперированы на одной фемтосекундной лазерной системе, поскольку существуют высокие требования к форме и размерам донорского роговичного лоскута и роговичного ложа у пациента. Хирург с помощью фемтосекундного лазера вырезает в донорском материале требуемый лоскут, затем повторяет ту же операцию на пациенте, формируя роговичное ложе, помещает лоскут в ложе и наконец сшивает их. Поскольку формы донорского лоскута и ложа на глазу пациента повторены с высокой геометрической точностью, заживление происходит существенно быстрее, чем при механическом выкраивании лоскута и ложа.

Единственная в России фемтосекундная лазерная система «Фемто Визум» (рис.6) разработана в ЦФП ИОФ РАН при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям. В качестве режима воздействия мы выбрали вариант  $nJ/MHz$ . В установке используется объектив, который обеспечивает фокусировку излучения в двухмикрометровое пятно в толще роговицы. Поле зрения объектива дает возможность углового сканирования лазер-



Рис.6. Фемтосекундная лазерная система «Фемто Визум».

ного пучка по кадру размером не менее 200 мкм. Источником излучения служит фемтосекундный волоконный лазер FL300 собственной разработки. При частоте лазерных импульсов 1 МГц энергия в импульсе доходит до 2 мкДж, что позволяет реализовать  $nJ/MHz$ -режим при двукратном запасе по энергии в импульсе. Длительность импульса генерации лазера FL-300 менее 300 фс, длина волны генерации — 1040 нм.

Принцип проведения операции с использованием фемтосекундного лазера поясняется на рис.7.

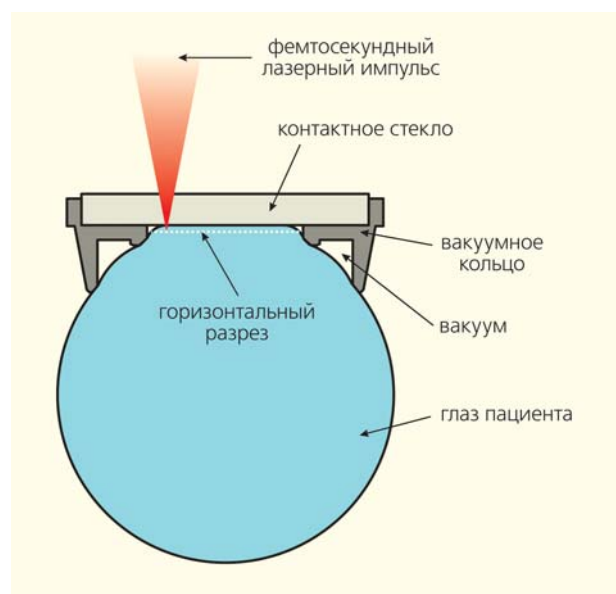


Рис.7. Разрезание по горизонтали (лазерный луч движется по двум координатам —  $X, Y$ ).

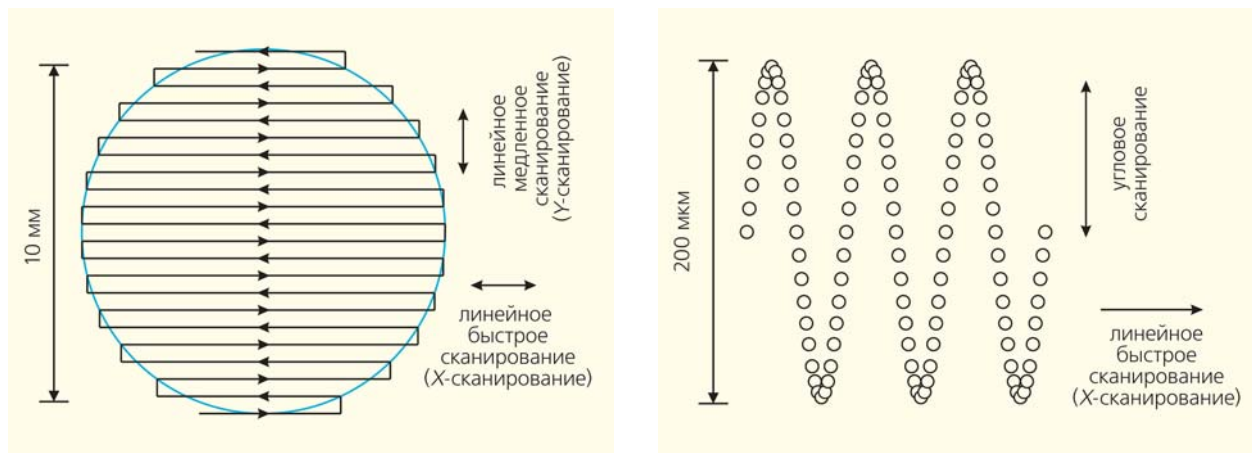


Рис.8. Метод сканирования лазерного пучка в строме роговицы.



На конференции «Лазеры в медицине». На переднем плане: А.М.Прохоров, И.А.Щербаков, В.В.Осико. 1989 г.

Плоское (или вогнутое) стекло прижимается к глазу с помощью вакуумной присоски, которая жестко связана с офтальмологическим фемтосекундным лазером. После фиксации глаза луч, сфокусированный в строму роговицы, сканируется по специальному алгоритму, который задается типом проводимой операции. В случае Фемто-ЛАСИК

фокальное пятно действует на глубине около 100 мкм по площади диаметром около 9 мм. Внутри рабочего поля объектива системы (200 мкм) пучок лазера перемещается высокоскоростным резонансным сканером по одной координате Y, а все поле операции (диаметром до 10 мм) покрывается участками по 200 мкм за счет X-Y-растрового передвижения объектива с помощью пьезоподвижек (рис.8). При этом расстояние между соседними пятнами (от каждого лазерного импульса) составляет менее 5 мкм.

Ключевые преимущества применения фемтосекундной лазерной системы «Фемто Визум» в офтальмологии — воспроизводимость и точность операций (толщина клапана, глубина надрезов, размер и форма трансплантата при кератопластике), малое время проведения операций (<15 с для клапана диаметром 9.5 мм при операции ЛАСИК), широкий спектр возможных операций (Фемто-ЛАСИК, роговичный карман, кератопластика, роговичные тоннели, дуговые послабляющие надрезы).

В сочетании с «Микроскан Визум» система «Фемто Визум» образует лазерный офтальмологический комплекс, который позволяет решать широкий спектр задач по коррекции зрения и ряду микрохирургических операций. В настоящее время эти системы успешно применяются во многих клиниках России. И этим мы во многом обязаны Александру Михайловичу Прохорову, который был не только одним из создателей лазерной техники, но и «вечным двигателем» ее продвижения в жизнь. ■

## Литература

1. Trokel S., Sbrinivasan R., Braren B.A. Excimer laser surgery of cornea // Am. J. Ophthalmol. 1983. V.96. P.710–715.
2. Atejev V.V., Bukreyev V.S., Vartapetov S.K. et al. Excimer laser system «Profile-500» // ALT'98 Selected papers on novel laser methods in medicine and biology, SPIE. 1999. V.3829. Paper 3829-19. P.124–127.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973.
4. Srinivasan R., Sutcliff E., Braren B. Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses // Appl. Phys. Lett. 1987. V.51. P.1285–1287.



# ***Жизнь памяти***



Памятник А.М.Прохорову работы скульптора Е.Казанцевой и архитектора А.Тихонова, установленный в 2015 г. недалеко от ФИАН, на пересечении Ленинского и Университетского проспектов.

# Такая замечательная жизнь

президент РАН академик В.Е.Фортон

Согласно древней традиции, благодарные ученики, храня память о своем учителе, рассказывают о нем остальным. Я тоже хочу поделиться воспоминаниями о своем наставнике Александре Михайловиче Прохорове.

Среди самых ярких индивидуальных черт этого замечательного человека хочется отметить его настоящую любовь к науке, бескомпромиссную, абсолютную преданность ей. Он жил наукой, отдал исследованиям всю свою жизнь без остатка. Для него не существовало ничего интереснее и занимательнее. Это был великий труженик, работавший до самых последних своих дней. Где бы и с чем бы он ни сталкивался, на первом месте всегда стояла наука.

О том, что для человека главное, всегда можно сделать вывод по его кабинету. Другой нобелевский лауреат, П.Бриджмен, говорил, что если стол в рабочем кабинете ученого пуст, а комната прибора, то хозяин этого кабинета, скорее всего, не творческий ученый и вряд ли сделает в науке что-то стоящее. Так вот, кабинет и рабочий стол у Александра Михайловича всегда были в «живописном беспорядке», который он сам и создавал, но всегда безошибочно ориентировался в нагромождении книг, последних отрисовок журналов, научных отчетов, осциллограмм, графиков, писем, черновиков... Он настойчиво призывал нас избегать в работе всего лишнего, не связанного непосредственно с научными исследованиями. Как-то раз при обсуждении вопроса о непомерном росте бюрократии Прохоров мудро заметил: «Да, все это так. Но каждый в начале пути должен решить для себя: наука для движения по бюрократической лестнице или бюрократическая деятельность для науки. И только после этого выбора надо идти вперед». И тут же привел несколько ярких примеров наших выдающихся ученых и тех, кто погубил свой талант, утонув в бюрократическом болоте. Болоте, которое в то время только разрасталось, достигнув сегодня размеров океана.

Для Александра Михайловича наука была как воздух. Еще одно его удивительное качество — интерес ко всем разделам физики. Ко всем без исключения. Как никто, он глубоко понимал и чувствовал физику всю — целиком. Многие помнят, что стоило только начать рассказывать ему о каком-то новом явлении, пусть даже очень далеком от его собственных интересов, глаза его загорались, он молодец, начинал перебивать, спорить, давать свои оценки, предлагать оригинальные идеи и подходы, и в результате нередко возникали целые научные

направления. Направления, которые сегодня стали самостоятельными дисциплинами в науке, со своей методологией, с разнообразными приложениями, со своими лидерами, зачастую — учениками Прохорова, работающими теперь по всему миру.

Например, лазерное сжатие термоядерной плазмы в конических мишенях. Эта идея была предложена Александром Михайловичем и родилась из абсолютно абстрактного разговора по поводу возможностей ударных волн в физике плазмы. Когда я пришел к нему со своей темой (неидеальная плазма, ударные волны, высокие давления), то, откровенно говоря, думал, что придется долго объяснять наши дела. Меня поразило, что он сразу схватил суть, задал очень квалифицированные и точные вопросы. В итоге, начав с простых работ, сейчас мы умеем получать колоссальные (на уровне нескольких миллиардов атмосфер) давления в веществе при его сжатии в ударных волнах, генерируемых лазерными импульсами. И подобных примеров много.

Александр Михайлович обладал даром находить общий язык с самыми разными людьми: и с начальством разного уровня, и с теми, кто младше его по возрасту, должности. Он не был ортодоксом, хотя, казалось бы, мог спокойно почитать на лаврах, опираясь на свой мировой авторитет и признание. Рано достигнув всех жизненных высот: лауреат Нобелевской премии, дважды Герой Социалистического Труда, академик-секретарь Центрального отделения Академии наук, Александр Михайлович был открыт для тех, кто входил в его круг, который составляли люди увлеченные, пришедшие к нему с перспективными идеями и готовые посвятить себя тому, что им было интересно и во что они верили.

Когда нужно было встретиться с ним по научным, а иногда и по житейским, вопросам, я шел на эту встречу с удовольствием. Я знал, что получу очень взвешенную, точную и часто неожиданную-нетривиальную оценку или совет. Он никогда не говорил: «Вы должны действовать так, как я скажу, и не иначе». Но если уж Александру Михайловичу что-то не нравилось, он разговаривал с людьми довольно жестко. Мне довелось быть свидетелем нескольких разносов — это впечатляло.

Надо сказать, что Прохоров очень много времени уделял организации науки, особенно в последнее время. Когда начались 90-е годы, Александр Михайлович, как и большинство интеллигентных людей, понимал, что изменения необходимы. Внутренний настрой на перемены был и у него, и у его сотрудников, однако, как мне кажется, он со скеп-

сисом смотрел на то, как все происходило в реальности. Он очень переживал, наблюдая за реформами 90-х годов, когда финансирование науки было сокращено в 20–30 раз. С горечью и болью смотрел он на то, что происходит с нашей наукой, и занимал очень активную и наступательную позицию в данном вопросе. Прохоров написал одну важную статью, я ее помню почти дословно. Она произвела тогда сильное впечатление на научное сообщество. Статья была опубликована в «Известиях» 7 сентября 1994 г. и называлась «А нужен ли я своей стране?». Человек, который добился всего в науке, в жизни, прошел войну,



А.М.Прохоров и В.Е.Фортов. ИОФ РАН. 2000 г.

с горечью говорил о том, что происходит, и о том, что опасного еще будет происходить. Это было очень важное предостережение об опасностях, которые подстерегают нас в будущем при движении по той траектории, куда в то время скатывалась страна. Многие из нас этого не понимали и в немалой степени были удивлены такой позицией мэтра. Ведь у большинства в то время была эйфория, ждали, что с исчезновением центральной системы партийных органов быстро все изменится, наладится, станет правильным и замечательным. Страна резко рванет вперед. Мы везде станем первыми. Александр Михайлович не был таким наивным, как мы тогда, он предвидел жестокие потрясения, грозящие науке в случае проведения псевдореформ. Но он был скорее не скептиком, а энтузиастом, и, считая Академию наук лучшим местом для занятия фундаментальной наукой, делал все, чтобы укрепить ее и защитить от разного рода шоковых ударов. Отлично понимая силу, ценность и значение науки для будущего страны, Александр Михайлович любил ученых, опекал их, заботился о них, используя весь свой авторитет и сверхтяжелый административный вес.

Прохоров обладал особым, замечательным и тонким, чувством юмора, которое рельефно проявлялось в сложных нестандартных ситуациях. Когда была сделана очередная попытка омоложения Академии, для пожилых и известных ученых ввели должность научного советника, чтобы те могли продолжать работать. Когда на Президиуме РАН обсуждался вопрос о научных советниках, он привел пример своего кастрированного кота, который, участвуя в кошачьих драках, работает, по мнению Александра Михайловича, в кошачьем коллективе советником.

Расскажу одну историю личного характера. В начале 80-х у меня не сложились отношения с моим шефом в Институте химической физики АН СССР, где директором был лауреат Нобелевской

премии Н.Н.Семенов. Я пришел к Александру Михайловичу и попросился перейти к нему на работу в Физический институт АН СССР. Тогда как раз возникло новое направление исследований — лазерные ударные волны. Александр Михайлович сказал, что возьмет меня к себе с удовольствием, но в ФИАН нет взрывной экспериментальной базы. Поэтому в случае моего перехода работы по взрывной генерации плазмы будут остановлены и мы потеряем темп. Прохоров вызвался поговорить на этот предмет с академиком Семеновым, благо они были старинные друзья. Разговор состоялся в моем присутствии на Общем собрании Академии наук. Александр Михайлович начал говорить добрые слова в мой адрес. Николай Николаевич поддержал благожелательный для меня разговор и задал, слегка кокетничая, Александру Михайловичу вопрос: «Саха! Я, конечно, поддержу Фортова. Он молодой человек, и я к нему всегда относился хорошо. Но, как ты думаешь, почему у меня в Химфизике так быстро растет молодежь?» Александр Михайлович отреагировал моментально: «Это потому, что у тебя в Химфизике ты молодежь г...м поливаешь. Вот они быстро и растут!» В ответ раздался общий хохот.

С тех пор у меня не было в ИХФ никаких проблем. Да и сейчас многие из вопросов решаются благодаря зримой и незримой помощи этого удивительного человека — Александра Михайловича Прохорова. Кто-то связан с ним годами дружбы и совместной работы. Многие являются учениками Александра Михайловича в первом, втором и третьем поколениях. Конечно, этого человека сейчас очень не хватает. Не хватает учителя, не хватает отзывчивого, доброго, теплого человека. Не хватает борца, который был бы очень кстати сейчас, в нынешнее трудное и турбулентное время. Поэтому давайте не забывать все это, давайте использовать каждый повод, чтобы вспомнить нашего неповторимого современника Александра Михайловича Прохорова. ■

# Штрихи воспоминаний

вице-президент РАН академик Ж.И.Алферов

Я познакомился с Александром Михайловичем Прохоровым в конце 1969 г. У Александра Михайловича ко мне был вполне профессиональный интерес, потому что в то время возникла проблема диодной лазерной накачки. Встретились мы с ним первый раз у него в кабинете в ФИАН, обсуждали эту проблему, и, я думаю, с этого момента у нас начались хорошие профессиональные контакты.

Для меня Александр Михайлович был великим ученым. И я был польщен тем, что он уделяет мне много внимания и мы встречаемся. Сразу же он к этому делу активно подключил Бориса Васильевича Бункина.

Было очевидно, что основная цель, которую мы тогда ставили перед собой, — сделать мощную диодную накачку, которая могла бы работать и на лазерное оружие, и на лазерный термояд, — очень трудно выполнима (она по-настоящему не решена и сегодня). Нам стало ясно, что эта проблема — многолетняя. А вот для лазеров на иттрий-алюминиевых гранатах накачку сделать было намного проще, и Александр Михайлович сразу подключил к этим работам тогда «очень закрытого академика» Аркадия Георгиевича Шипунова из Тулы. К нам приехал от него сотрудник — Рошаль, его Александр Михайлович на это дело подвинул. И первое, что мы сделали, — это, действительно, диодную накачку для алюмоиттриевых гранатов. А дальше у нас начались совместные работы с группой Павла Павловича Пашинина по поиску различных модификаций полупроводниковой накачки. В результате мы опубликовали первые работы по диодной лазерной и светодиодной накачке твердотельных лазеров при комнатной температуре.

Александр Михайлович всегда поддерживал наши исследования, всегда ими очень интересовался, очень много помогал продвижению этих работ в промышленность. Значение исследований гетероструктур он оценил сразу.

Прохоров, приезжая в Ленинград, всегда приходил ко мне в лабораторию. Иногда мы проводили время вместе и после работы. Александр Михайлович вообще имел какое-то чутье на хороших людей. И он очень любил у нас в Ленинграде Николая Ивановича Комяка. Николай Иванович Комяк был в то время генеральным директором НПО «Буревестник», которое занималось разработкой и промышленным выпуском рентгеновской аппаратуры, и был, безусловно, лидером научного приборостроения в стране. И когда приез-

жал Александр Михайлович в Ленинград, иногда мы встречались втроем.

Приближалось его 60-летие в 1976 г. И мы, естественно, очень хотели бы, чтобы Александр Михайлович получил вторую звезду Героя. Как-то мы после сауны на фирме Комяка поиграли на бильярде, и я задаю вопрос: «Александр Михайлович, приближается ваше шестидесятилетие. Вам должны по вашим научным заслугам дать вторую звезду Героя Социалистического Труда». — «Какая проблема?» — «По положению о дважды Героях нужно ставить бюст на родине награжденного, т.е. в Австралии, в городе Атертон». Александр Михайлович ответил: «Жорес, задача будет решена очень просто». Я говорю: «Как?» — «Просто не дадут второй звезды».

Действительно, дали орден Ленина. К 70-летию мы уже хорошо подготовились — в проекте Указа было записано: «...установить бюст в городе Москве».

Он очень любил приезжать к нам в Питер. К Питеру у него были особые чувства — ведь он окончил Ленинградский университет. И часто бывал у нас в институте. У него были прекрасные отношения с Анатолием Петровичем Александровым.

Вспоминается, например, вот такая история. Александр Михайлович и Анатолий Петрович приехали в Ленинград, в Физтех. Мы решили пообедать в Доме ученых в Лесном, у Политехнического института. Поскольку пришли такие важные гости, директор Дома ученых распорядился, чтобы стол для обеда был накрыт у него в кабинете. Обедали мы четвером: Александр Михайлович, Анатолий Петрович, Владимир Максимович Тучкевич и я.

Директор Дома ученых спрашивает у Александра Михайловича и у меня: «Обед днем. Как мне, алкоголь на стол поставить или нет?» Александр Михайлович говорит: «Да... Жорес, а ты как считаешь?» Я говорю: «Конечно, нужно поставить». Александр Михайлович говорит: «Давайте поставим». Мы сели обедать, на столе уже стоит бутылка «Столичной». Александр Михайлович говорит: «Анатолий Петрович, вот тут мы с Жоресом обсуждали, стоит ли ставить бутылку водки на стол в обед, потому что обед все-таки днем... Я сказал, что сложно это, а Жорес считает, что нужно поставить. А каково ваше мнение?» Анатолий Петрович: «Конечно, нет». Александр Михайлович говорит: «Тогда убираю». Анатолий Петрович говорит: «Да что вы, раз она уже стоит! Разве можно убирать?»

Вспоминается еще одна история, но она скорее про Мстислава Всеволодовича Келдыша. Это было в 1973 г. Директором ФИАН стал Николай Геннадьевич Басов. Отношения Николая Геннадь-



На выездной сессии Отделения общей физики и астрономии АН СССР в Ташкенте, вторая половина 80-х годов. Слева направо: Е.В.Трушин, К.А.Валиев, М.Ашуров, Е.А.Виноградов, Ж.И.Алферов, (?), С.А.Ахманов, (?), А.М.Прохоров, (?), Ф.В.Бункин, (?), (?).

евича и Александра Михайловича не были простыми. Появился проект создания в ФИАН отделений. Но тогда нужно изменять Устав ФИАН. Сейчас многие крупные институты, в том числе и ФИАН, Физтех, Институт ядерной физики имеют отделения, а тогда ни один институт их не имел. Поэтому вопрос об отделениях ФИАН и об изменении его Устава был поставлен на Общем собрании Академии наук. Во время обсуждения выступил академик-ракетчик и задал вопрос Келдышу о численности сотрудников в ФИАН. Келдыш ответил: «Три тысячи человек». Академик говорит: «Ничего не понимаю. У меня в институте десять тысяч и никаких отделений. А там три тысячи, и чтобы были отделения!» На что ему Келдыш ответил: «У вас десять тысяч, но это всего лишь одно сопло ракеты. А в ФИАН три тысячи, но это вся советская физика».

В начале 90-х годов мы вместе с Александром Михайловичем полетели в Штаты, в Ливермор. Это был тяжелый перелет. Из Москвы самолет летел через Аляску с посадкой в Анкоридже,

затем в Сан-Франциско, и потом мы приехали в Ливерморскую лабораторию.

Там мы провели несколько дней, обсуждая возможности сотрудничества. Ливерморовцы решили сфотографироваться вместе со всеми нами. Руководитель Ливермора обратился к Александру Михайловичу: «Академик Прохоров, ведь благода-



Президент АН СССР академик А.П.Александров поздравляет А.М.Прохорова с 60-летием.



Ж.И.Алферов выступает на открытии памятника А.М.Прохорову 9 июля 2015 г. Слева сын академика К.А.Прохоров, справа директор ИОФ РАН И.А.Щербаков.

ря вам все это существует, благодаря вам и вашим работам. Вы — основатель квантовой электроники», — и уговорил его сесть в центр.

Отношения между Александром Михайловичем и Николаем Геннадьевичем Басовым на каком-то этапе были сложными. Однажды я вернулся из командировки в Одессу и, встретившись с Александром Михайловичем, сказал ему: «Александр Михайлович, а вы знаете, что главная улица в Одессе названа в вашу честь?» — «Вы что, Жорес?» — «Ну а как же, ведь она называется Дерibasовская!» Александр Михайлович много смеялся.

Я бы сказал, что эти сложные отношения можно объяснить, потому что некое чувство ревности, когда люди занимаются примерно одним и тем же, у научных сотрудников возникает часто. Нужно иметь в виду еще и то, что Николай Геннадьевич — ученик Александра Михайловича. Николай Геннадьевич был необычайно талантлив, с очень интересным физическим мышлением. Хорошо, что по крайней мере последние 10–15 лет у них были прекрасные дружеские отношения. И некая ревность ушла в прошлое. В конечном счете, великими физиками можно назвать обоих.

В 1980 г. мы отмечали столетие со дня рождения Абрама Федоровича Иоффе. Заседание Президиума по этому поводу проходило у нас в Ленинграде, в здании Академии наук. Анатолий Петрович безумно любил Абрама Федоровича. Для него Абрам Федорович — учитель, отец советской физики и отец родной. Анатолий Петрович всегда прекрасно выступал и, произнося вступительное слово, сказал: «Вот еще я должен добавить, что благодаря Абраму Федоровичу у нас в Физтехе мы очень дружно жили. Не было у нас ни Басова, ни Контрабасова». Оба сидели в Президиуме. Александр Михайлович рассмеялся. А Николай Геннадьевич немного посуровел.

В 1987 г., когда начались исследования высокотемпературной сверхпроводимости, Юрий Андреевич Осипьян организовал замечательное выездное заседание Политбюро в Черноголовке. Приехали к нам Н.И.Рыжков, Е.К.Лигачев. М.С.Горбачева не было, но был почти полный состав Политбюро. Академики выступали с научными докладами. Я обратил внимание на то, что Л.Н.Зайков, член Политбюро, бывший секретарь Ленинградского обкома, конспектировал все наши выступления. А потом выступил по итогам заседания Политбюро Лигачев. И сказал в стиле, как когда-то Никита Сергеевич выступал: «Цели определены, задачи ясны, за работу, товарищи! Но имейте в виду, что никакого золотого дождя для вас не будет». Александр Михайлович сидел в первом ряду и спокойно сказал: «Егор Кузьмич! А без дождя и урожая не будет».

Для Александра Михайловича было характерно очень хорошее, бережное, уважительное отношение к своим сотрудникам. Александр Михайлович прожил счастливую жизнь, получил мировое признание, и очень важно, что он жил тогда, когда наука была нужна, и он чувствовал себя все время нужным стране.

В течение 18 лет (1973–1991) Александр Михайлович был руководителем — академиком-секретарем Отделения общей физики и астрономии Академии наук. И это был, безусловно, лучший руководитель физического сообщества страны. Сменивший его в 1991 г. на волне так называемых демократических выборов академик Леонид Вениаминович Келдыш, пробыв один срок, понял, что быть просто хорошим физиком недостаточно для такой должности, и ушел в отставку. Александр Михайлович переживал этот нелегкий для него период, но для нас он оставался нашим учителем и руководителем независимо от должности. Я помню, как горячо и искренне он радовался присуждению мне в 2000 г. Нобелевской премии по физике, и помню его просто счастливое выражение лица, когда в своей лекции в ФИАН я назвал его своим учителем. И я горжусь и сегодня, считая себя учеником Прохорова.

Широкие и разносторонние знания и мировое признание определили его назначение правительством страны главным редактором Большой советской энциклопедии. Благодаря ему мы получили не только третье издание БСЭ, но и массу новых энциклопедических изданий, особенно ценных для физики и медицины.

В истории советской науки есть имена ученых, которые определяли не только развитие науки, но и судьбу страны: А.Ф.Иоффе, С.И.Вавилов, И.В.Курчатов, М.В.Келдыш, А.П.Александров, С.П.Королев... Александр Михайлович Прохоров — один из них. ■

# Александр Михайлович был смелым человеком

академик Ф.В.Бункин

*Научный центр волновых исследований ИОФ РАН*

Некоторым людям, особенно тем, кто далек от науки, это свойство характера Александра Михайловича может показаться необязательным для успешной работы ученого. Однако это совсем не так. Говоря о смелости Александра Михайловича, я имею в виду не только его личное мужество, проявленное во время Великой Отечественной войны, когда он был награжден боевой медалью «За отвагу». Этот факт сам по себе ярко отражает характер Александра Михайловича как выдающейся личности. Я обращаю внимание на его научную смелость, которая, с моей точки зрения, стала залогом научных достижений Александра Михайловича. Успеть в течение одной жизни сделать в физике так много, сколько сделал Прохоров, было бы невозможно без его неумной страсти проникновения в новые для себя области исследований. Известно, что многие, даже известные, ученые вторую половину своей научной деятельности «стригут газон» своего научного задела, созданного в молодые годы. Научная смелость Александра Михайловича проявилась в трех характерных чертах стиля его научной работы.

Во-первых, это, конечно, уже отмеченный его неистощимый интерес к познанию окружающего мира. Во-вторых, это поразительно глубокая научная интуиция, позволявшая ему вовремя увидеть зарождение новых перспективных направлений в физике. Все новые идеи Александр Михайлович схватывал на лету. Кстати сказать, он очень любил, когда к нему приходили сотрудники с «брედовыми» научными предложениями. Никого из них он никогда не «гасил» своим отрицательным мнением, если видел в таких предложениях хотя бы что-то заслуживающее дальнейшего изучения. Это особенно ценили молодые ученые; они часто стремились попасть на обсуждение своих идей лично к директору, минуя непосредственных шефов. Исключительная научная интуиция Прохорова играла немаловажную роль в его многолетней деятельности в должности академика-секретаря Отделения общей физики и астрономии (ООФА) АН СССР, когда ему приходилось брать на себя ответственность выбора

перспективных направлений работ в институтах ООФА всей страны.

Конечно, чтобы взяться за разработку нового направления в такой «дорогостоящей» науке, как физика, одной интуиции мало. Необходим еще исследовательский опыт и, главное, фундаментальные знания, чем Прохоров несомненно обладал как в физической, так и в других областях (недаром он долгие годы был главным редактором Большой советской энциклопедии). Он всегда подчеркивал особую важность развития фундаментальных знаний в области естественных наук как вообще основы развития цивилизации.

На третьей составляющей научной смелости Александра Михайловича я хочу остановиться более подробно. Речь пойдет о его стремлении внедрять вновь открываемые физические явления в решение практических задач. Хорошо известно, как трудно это было делать в советские времена, когда речь шла о внедрении новых идей и технологий в бытовую продукцию. В то же время фундаментальная физика оказалась весьма востребованной для развития военно-промышленного комплекса. Шла холодная война, две противоборствующие сверхдержавы соревновались в создании новых образцов военной техники. Для физиков это была благоприятная пора щедрого целевого финансирования специальных научных работ в интересах ВПК (конечно, в ущерб благосостоянию страны). Участие Прохорова и его сотрудников в этих работах в течение многих лет, во-первых, привело к существенному расширению научной тематики всей прохоровской команды и к росту ее научного потенциала. Во-вторых, это способствовало значительному укреплению материальной базы лабораторий. Ярким примером и своеобразным памятником последнему служит основной корпус ИОФ РАН, который был построен по постановлению Правительства СССР во исполнение коллективом сотрудников, руководимым Александром Михайловичем, большой работы под кодовым названием «Омега». Археологи будущего могут обнаружить в фундаменте этого здания замурованную капсулу из нержавеющей стали, внутрь которой на цепи вложена греческая буква  $\Omega$ . Вряд ли они смогут связать эту находку с научной деятельностью нобелевского лауреата А.М.Прохорова. Для нас же, его сотрудников, такая, на первый взгляд, чисто символическая связь носит вполне реальный

Впервые опубликовано в книге «Александр Михайлович Прохоров: воспоминания, статьи, интервью, документы» (М., 2006).

© Бункин Ф.В., 2016



Рабочее совещание в новом корпусе «Омега». Слева направо: Ю.В.Рогов, А.М.Прохоров, И.Н.Сисакян, Ф.В.Бункин, Г.Я.Зуева. 1974 г.

смысл. Дело в том, что Александр Михайлович брался за участие только в таких прикладных работах, в которых прежде всего было необходимо провести комплекс физических исследований, чтобы затем направить по нужному руслу конструкторские решения. Бывали случаи, когда заказчики от ВПК ставили перед нами, физиками, задачи, которые приходилось решать с нуля. И здесь дело решали смелость Прохорова и его интуиция. Он брался и за такие задачи, и, как правило, решения находились. Те, кто непосредственно работал с ним, знают об «эффекте понедельника», когда он приходил на работу с новыми идеями относительно разрабатываемой задачи. Это было плодом его домашних размышлений и количественных оценок в выходные дни. А связь будущей археологической находки с именем А.М.Прохорова состоит в том, что в описываемом цикле прикладных работ было открыто и детально исследовано несколько новых физических явлений, а также предложены новые материалы и технологии их изготовления. Некоторые из этих результатов были в свое время отмечены Государственными премиями, другими правительственными наградами и вошли в арсенал современной физики.

Стремление Александра Михайловича к внедрению физических знаний в прикладные задачи естественным образом передалось его ближайшим

сотрудникам, стимулируя у них «синдром научной смелости». Этот синдром не обошел стороной и автора настоящей заметки. В конце 1970-х годов, уже будучи членом Академии наук, я решил заняться совершенно новой для себя научно-прикладной тематикой — гидроакустическим, радиолокационным и лидарным зондированием океана. Это мое решение для Прохорова было неожиданным, но он остался верен себе и благословил меня на эту «авантюру», несмотря на то что это направление работ совсем не входило в тематику ИОФАН (тогда еще Отделения А ФИАН). Здесь положительную (для меня) роль сыграла, по-видимому, не только личная решимость Прохорова как директора, но и его ответственность как академика-секретаря ООФА за развитие этого актуального направления

в Академии наук. Так в научной тематике ИОФАН родилось новое направление — гидрофизика, предметом исследований которой в настоящее время служит не только дистанционное зондирование природных водных сред, но и вообще изучение различных аспектов физики жидкости (главным образом воды и ее растворов).

Заканчивая эти заметки, не могу не коснуться еще одной стороны характера Александра Михайловича как ученого. Если посмотреть на список его научных трудов, написанных в соавторстве, то за редким исключением его фамилия стоит в алфавитном порядке. Это тоже, если хотите, проявление научной смелости — он никогда не опасался того, что его научные заслуги могут «раствориться» в обилии соавторов. Этот факт также отражает его благожелательное отношение к своим сотрудникам. Он всегда считал, что в число соавторов выполненной с его участием работы должны входить все ее участники, и в первую очередь — молодые. Кстати, это «прохоровское правило» в отношении соавторов в ИОФАН стало теперь обычным делом. В заключение хочу выразить надежду, что ученики и последователи Александра Михайловича, работающие в институте его имени, будут стремиться культивировать среди своих сотрудников стиль работы Основателя, в том числе и научную смелость. ■

*Текст был уже сверстан, когда пришло печальное известие о смерти его автора. Федор Васильевич Бункин на протяжении многих лет был ближайшим соратником Прохорова, сначала в ФИАН (куда пришел в аспирантуру в 1952-м), а потом и в ИОФАН. Именно он в конце 60-х работал над теоретической частью проекта «Омега» по использованию лазеров в оборонных целях. Признанный авторитет в области квантовой электроники, нелинейной оптики, теории конденсированных сред, гидроакустики, лауреат Государственных премий СССР и РФ, Бункин до конца своих дней оставался в строю, будучи директором НЦВИ ИОФ РАН.*



# Alexander Michailovich Prokhorov

## Александр Михайлович Прохоров

Charles H. Townes / Чарлз Х. Таунс

Alexander Prokhorov and I first met in 1955 at a scientific meeting of the Royal Society in Oxford, England. I had not before that occasion realized he was working on producing a maser, and to my amazement he gave a talk on this work being done in his laboratory with Basov who also attended the meeting. We had a great time together in Oxford, getting acquainted and talking about our common scientific interests, especially masers and their possibilities.

Another memorable occasion was Sasha's first trip to the USA to attend the first Quantum Electronics Conference in 1959. I was pleased that he could then also visit our home in New York and my laboratory at Columbia University.

Still another «first» was my first visit to Russia in 1965. We had of course had a good time together at the Nobel Prize Awards Ceremony in Stockholm in 1964, when we were both awarded the Prize. And there he invited me to visit Russia. It was an excellent visit. I of course had an opportunity to see his laboratory and work, but also to visit his dacha in the countryside. He also arranged a very interesting visit for my wife and me to many other parts of Russia.

We have been at many meetings together, including a memorable one honoring his 80<sup>th</sup> birthday, and have had many fruitful scientific exchanges.

Alexander Prokhorov was not only a great scientific figure, creative and original. He was a person of broad outlook and great charm, always with amusing jokes and stories — a very pleasant person to be with. Along with many others, I will always remember him with much appreciation and pleasure. He leaves a great legacy!



А.М.Прохоров и Ч.Таунс (1915–2015) гуляют по Москве. На Якиманке у французского посольства.

Мы с Александром Прохоровым впервые встретились в 1955 г. на научной конференции Королевского общества в Оксфорде (Англия). До этого времени я не мог себе представить, что он работает над созданием мазера, и, к моему изумлению, он рассказал о своей работе, выполненной в его лаборатории совместно с Н.Г.Басовым, который также принимал участие во встрече. Мы вдвоем отлично провели время в Оксфорде, глубже узнавая друг друга и разговаривая о наших общих научных интересах, главным образом о мазерах и их возможностях.

Другим памятным событием была первая поездка Саши в Соединенные Штаты для участия в первой Конференции по квантовой электронике в 1959 г. Я был доволен, что тогда он смог также посетить наш дом в Нью-Йорке и мою лабораторию в Колумбийском университете.

Еще одним «первым разом» стал мой первый визит в Россию в 1965 г. Конечно, мы вдвоем хорошо провели время во время церемонии вручения Нобелевской премии в Стокгольме в 1964 г., когда оба получили премию. И он пригласил меня посетить Россию. Это был отличный визит. Я получил возможность осмотреть его лабораторию и ознакомиться с проводимыми работами, а также посетить его дачу за городом. Он организовал очень интересную поездку для нас с женой в некоторые другие города России.

Мы были вместе на многих встречах, включая один памятный день в честь его 80-летия, и у нас было множество плодотворных научных дискуссий.

Александр Прохоров был не только великой научной фигурой, творческой и оригинальной. Он был человеком широких взглядов и большого шарма, всегда с забавными шутками и рассказами, — человеком, с которым было приятно находиться рядом. Вместе с другими я буду всегда его помнить с большой признательностью и удовольствием. Он оставил огромное наследство!

© Перевод  
А.К.Прохорова

Впервые опубликовано в книге «Александр Михайлович Прохоров: воспоминания, статьи, интервью, документы» (М., 2006).

# Несколько слов о моем дедушке

А.К.Прохоров,  
кандидат физико-математических наук  
Москва

Самые первые воспоминания о дедушке у меня довольно смутные. Я помню, что жили мы на улице Губкина. Мои родители, моя прабабушка (мама жены Александра Михайловича) и я жили в одном подъезде, на пятом этаже. А Александр Михайлович с Галиной Алексеевной — в другом, на шестом этаже, туда меня довольно часто водили в гости. И практически с рождения я проводил время на даче дедушки, в академическом поселке Новодарино. В раннем детстве (до четырех-пяти лет) я, конечно, не имел ни малейшего понятия, чем занимается мой дедушка, где он работает. Зато я помню, как они с бабушкой приезжали на дачу в пятницу и уезжали в понедельник утром.

Помню, как по утрам дедушка делал зарядку перед беседкой, как потом совершал легкую пробежку по нашей просеке. И еще они вместе с бабушкой ходили играть в теннис. Больше всего меня радовало, когда дедушка разрешал мне взять ключ от сарая, где было свалено всякое барахло. Бабушка не всегда оставалась довольна моим копанием в сарае, так как я часто брал ее садовые инструменты. Но больше меня завораживали всякие ящики с гвоздями, винтами, баночки с маслом и прочее. Самыми главными инструментами были два молотка. Один обычный, с черной деревянной ручкой, чуть треснутой снизу, и другой, похожий на маленький молот, с очень гладкой светлой ручкой. Еще были старые клещи. У меня не хватало сил вытаскивать с их помощью гвозди, и мне помогал дедушка. Тогда же он научил меня подкладывать под них маленький деревянный брусок, чтобы тянуть было легче. Вот со всем этими подручными средствами я постоянно что-то делал. Правда, работа, совершенная мною, оказывалась нулевой, и большинство обитателей дачи не одобряло мои потуги, но дедушка меня всегда негласно поддерживал.

Я очень любил гулять. Вечером дедушка и бабушка ходили на прогулку. Обычно они встречались с Леонидом Максимовичем Бреховских, с Николаем Константиновичем Кочетковым или с Михаилом Дмитриевичем Миллиончиковым. Иногда брали меня. И тогда я семенял рядом и слушал всякие разговоры. Еще мне нравилось разводить костер вместе с дедушкой. У нас на территории было нечто вроде печки, в которой можно было развести костер и что-то готовить. По-



Дедушка и внук.

мню, в этой печке мне впервые удалось частично расплавить старую лыжную палку из алюминия.

Дома в Москве я тоже не отставал в своих «экспериментах». Всегда разбирал все игрушки, которые мне дарили, и дошел до того, что как-то развинтил новейшие электронные часы, подаренные дедушке. Скандал был ужасный, меня долго ругали, и опять мне досталось ото всех, кроме дедушки. Потом, когда все стихло, он просто сказал, чтобы я больше так не делал, а если мне что-то нужно, чтобы я спрашивал у него.

Наверно, когда я собирался пойти в школу (где-то в возрасте около семи лет — точно не помню), мне уже рассказали, что мой дедушка занимается физикой и много работает. Я любил сидеть у дедушки в кабинете и слушать всякие рассказы о его жизни, о работе и о войне: как он воевал, как был ранен и как радовался возвращению домой.

Рассказы дедушки про войну мне особенно запомнились. Рассказывал он немного, но всегда это были мрачноватые истории. Про войну вспоминала и бабушка, Галина Алексеевна: как искала мужа в госпитале, как перевозила его, как ему делали операции, как он чудом выжил. Бабушка бережно хранила письмо, которое дедушка написал ей из госпиталя после очередного ранения, левой рукой. Оно было ей очень дорого. Именно от бабушки я впервые узнал, что группе разведчиков, которой командовал дедушка, удалось взять в плен «языка», — это заставило меня очень и очень сильно гордиться дедушкой! А из дедушкиных рассказов мне особенно врезался в память случай, как однажды командир их отряда отъехал куда-то и назначил дедушку старшим. Через некоторое время другие солдаты стали просить его разрешить им взять грузовик и сгонять в соседнюю деревню за едой. Дедушка честно мне говорил, что в тот момент он колебался: уж больно заманчиво выглядело предложение. Однако он понимал, что если командир неожиданно вернется и обнаружит отсутствие грузовика, да еще с солдатами, то им может грозить суровое наказание. В результате дедушка не разрешил взять грузовик, и так получилось, что командир действительно вернулся намного раньше. Этот эпизод мне был приведен в качестве примера того, как необходимо четко выполнять приказы и распоряжения.

После войны тот факт, что дедушка воевал, имел простую медаль «За отвагу», которой он очень гордился, позволял ему легко общаться с военными. Мне об этом сам он не рассказывал, но уже позже говорили многие его коллеги.

Дедушка с бабушкой и в городе часто ходили гулять вечерами, а иногда мы гуляли вдвоем с дедушкой. Мне кажется, именно во время одной из таких прогулок дедушка впервые рассказал об Австралии, где он родился. В памяти у него осталось не очень многое, но это были очень яркие воспоминания. Разноцветные бабочки, лес, река. Он рассказывал, что когда они с другими детьми куда-то уходили, то брали у какого-то человека часы. И зачем-то всегда по возвращении окунали эти часы в воду. Дедушка так и не смог мне сказать, зачем ребята это делали, и для меня это осталось загадкой. Думаю, именно тогда я понял, что не все поступки можно разумно объяснить. Я жалею, что мы с ним так и не слетали вместе в Австралию. Знаю, что он хотел ее посетить, но, как он сам говорил, не сложилось: вначале не хватало времени, был занят на работе. А потом уже здо-

ровье не позволяло. Хотя дедушку очень звали на конференцию, посвященную юбилею создания лазера. Тогда он серьезно думал поехать, но что-то помешало...

Дедушка любил мне рассказывать и о своих первых годах в СССР, после возвращения из Австралии. В частности, про Ташкент, где он жил с родителями и ходил в школу. Сначала семья вернулась в Оренбург, откуда была родом его мама, но после Австралии им было сложно привыкнуть к холодному климату, и они перебрались в Ташкент. Свою любовь к теплому Ташкенту дедушка пронес через всю жизнь. Я помню, как иногда к нам домой приходил, а иногда просто передавал нам посылки аспирант дедушки — Мухсин Ашуров. По тем временам это были волшебные посылки! Фрукты, овощи и обязательно дыня. Бабушка рассказывала, как много лет спустя, когда она с дедушкой была на какой-то научной конференции в Ташкенте, она вместе с Мухсином ходила искать школу, в которой когда-то учился дедушка. Пытался и я ее найти, и также мне в этом помогал Мухсин. На улице Гоголя сохранилось здание, где могла помещаться школа, но теперь там библиотека, и никто не может сказать, что там было в 20-е годы.

Удивительно, но про Ленинград, куда семья переехала после Ташкента, дедушка говорил меньше, чем про Австралию или Ташкент. Возможно, стало больше взрослых проблем. Или это связано с тем, что в Ленинграде во время блокады погиб его папа — Михаил Иванович. Где он похоронен, неизвестно. Маму успели эвакуировать в Среднюю Азию, где она умерла в 1944 г. Но, с другой стороны, дедушка очень любил и всегда поддерживал свою племянницу Сюзанну, которая жила в Питере. Они созванивались, переписывались и встречались. У мамы Сюзанны, Евгении Михайловны (сес-



Решаем задачи на даче.



А.М.Прохоров с внуком Александром и Н.Г.Басов с сыном Дмитрием. 2001 г.

тры дедушки), был тяжелый характер (об этом мне говорил муж Сюзанны Александр). Вероятно, поэтому они с дедушкой редко общались.

Помню, когда я уже ходил в школу, моя бабушка, Галина Алексеевна, мне впервые рассказала, что дедушка получил очень известную премию по физике и что этой чести удостоились немногие. Тогда я, видимо, не очень понял, что это за премия и зачем ее дали дедушке, но, хоть и с трудом, запомнил ее название — Нобелевская. Бабушка попросила меня не хвастаться этим в школе. Вообще, надо сказать, меня постоянно просили не хвастаться ни размерами квартиры, где мы жили, ни тем, что мой дедушка известный физик. Правда, с годами я понял, что людей, которые знают физика Прохорова, не так много. Сейчас же всех вообще больше интересуется, не родственник ли я Михаилу Прохорову! Но с детских лет во мне осталась желание не рассказывать о моем дедушке (кто он), и потому до сих пор на вопрос о родстве с академиком Прохоровым я отвечаю отрицательно.

Дедушка рассказывал, как впервые познакомился с электричеством. Он по многу раз включал и выключал лампочку в надежде, что та не успеет вслед за движением выключателя загореться или погаснуть. Возможно, именно тогда у него возник интерес к разгадкам неизвестного... Мне же, конечно, была интереснее всего тема военных и лазеров. Многие смотрели фильмы «Гиперболоид инженера Гарина», «Звездные войны» и думали,

что лазерное оружие уже на подходе. Только спустя много лет Евгений Павлович Велихов и Петр Васильевич Васильевич Зарубин рассказали мне о первых работах по созданию прототипов лазерного оружия. К сожалению, на тот момент до реализации этих проектов было еще далеко. Сам дедушка практически не упоминал об этих работах, зато очень любил рассказывать о фианитах, использовании лазеров в медицине и всяких других своих идеях.

Еще в детстве дедушка удивлял меня тем, что работал по выходным. Подозреваю, что и гулять со мной он соглашался только из-за моих настойчивых просьб. У дедушки был журнал (который иногда заменялся новым), где он делал пометки о прочитанных статьях и иногда писал какие-то формулы. Его значки меня завораживали, и я также завел себе маленькую тетрадку, куда стал записывать подобие формул. Тогда это были бессознательные ряды всяких букв и цифр, но так я чувствовал (или пытался передать) свою солидарность с работой дедушки. Позднее моя тетрадка потерялась, о чем я до сих пор жалею: уж очень бы мне хотелось посмотреть, что я там писал в детстве! Могу сказать, что дедушка неплохо решал математические и физические задачи! Во всяком случае, он частенько помогал мне со школьными заданиями. У меня даже сохранилась фотография, где мы вместе сидим за столом на даче и каждый решает свои проблемы.

К сожалению, дедушка был очень занят на работе, и у него практически не оставалось времени на меня. Да и бабушка старалась, чтобы я поменьше его отвлекал. Хотя дедушка когда-то был большим радиолобителем, первый свой опыт с паяльником я получил от другого своего дедушки — Василия Григорьевича Преснухина, который практически всю жизнь проработал в так называемой «Кучинской шарашке» (НИИ-100 в Кучине). И свой первый приемник я собрал под его руководством. Зато дедушка Александр Михайлович снабжал меня радиодеталями. Правда, в конце концов ему надоело записывать, что мне нужно, он дал мне телефон Андрея Васильевича Ширкова, и я стал наедать ему...

Я запомнил, как дедушка всегда помогал бабушке. Бабушка, конечно, старалась полностью отгородить его от всех бытовых проблем, чтобы он занимался наукой и только наукой. Но он старался ей помогать, мог сделать любую работу по дому, если это требовалось. Помню, мы однажды с ним мыли посуду, и он говорил, что работа по дому очень важна и это тяжелый труд. И еще иногда рассказывал, как вместе со своим другом Леонидом Бреховских жил в общежитии.

И конечно, дедушка очень любил бабушку. У них были разные взгляды на многие вещи, но дедушка всегда уступал. Они любили путешествовать и отдыхать вместе, начиная от походов на лыжах и байдарках и кончая отдыхом в Подмосковье или за границей. Бабушка перенесла несколько тяжелых операций, на части лица у нее был поврежден нерв, и она очень переживала, что стала некрасивой (и не любила фотографироваться). Но дедушка всегда ее поддерживал, всегда везде брал с собой и никогда не стеснялся ее. Особенно трудно ему было, когда бабушка серьезно заболела и у нее начались проблемы с памятью. И только один раз я видел, как дедушка плакал: на кладбище, когда он хоронил бабушку и последний раз целовал ее.

Когда я подросток, как и мои родители, я ждал возвращения дедушки из командировки. Все знали, что он привезет что-то интересное! Вещи меня не очень привлекали, а восхищение вызывала всякая электроника и инструменты. Помню, я очень расстроился, когда очередной набор инструментов забрал себе папа. В следующий раз дедушка привез другой маленький набор и сказал, что эти инструменты его, он будет сам ими пользоваться и храниться они будут в его кабинете. Договориться с папой о пользовании инструментами мне не удалось, зато дедушка разрешил брать свои — при условии, что я буду всегда класть их на место. Но вообще-то, если дедушка собирался ехать в командировку один, всем было ясно, что купить нам подарки у него может не хватить времени (или это будет что-то совсем простенькое). Зато когда он ехал с бабушкой, все было спокойно: она уж точно обойдет все доступные магазины и выберет что-нибудь стоящее!

Для меня самым трудным было чем-то удивить дедушку и особенно — придумать ему подарок (на день рождения, на Новый год). Да и вообще получалось всегда так, что на праздники дед сам нам раздавал подарки, которые дарили ему. Меня всегда поражало огромное количество открыток, которые он приносил домой после праздников. Я их разглядывал и сортировал, очень необычными мне казались открытки из Японии. Когда у дедушки был день рождения, его вначале отмечали на работе, а потом дома. Несколько раз, когда были круглые даты, у нас дома собиралось особенно много народу. Маленьким я был невыносимым ребенком, как говорили взрослые. Бабушка меня специально инструктировала, как себя вести при важных гостях. Потом мне это повторяла мама. Но когда приходили гости, я либо дико стеснялся (это было позже, когда я подросток), либо вел себя ужасно. Как-то залез под стол, за которым сидели гости, и дергал всех за брюки... Зато я запомнил некоторых коллег дедушки, прежде всего Вячеслава Васильевича Осико и (много позднее) Жореса Ивановича Алферова.

Надо сказать, что дедушка очень любил анекдоты и веселые истории. И вообще был всегда рад удачной шутке. Про это можно много написать! Дедушка рассказывал, что раньше в ФИАНе и ИОФАНе постоянно проводили какие-то празднования, организовывали концерты и выступления. Между прочим, дедушка однажды упомянул, что когда-то в детстве играл на трубе. Но я ни разу не смог его уговорить продемонстрировать свои умения.

Еще дедушка любил читать. Любил рассказы Чехова и детективы (и мои первые прочитанные детективы были явно из его шкафа). В молодости дедушка с бабушкой и коллегами ходил в походы на байдарке, о чем подробно написала бабушка в своей книге. Мне достались только части байдарки, из которых собрать ее целиком не представлялось возможным. Еще дедушка увлекался альпинизмом и пешими походами (но тут никакого обмундирования мне не осталось). Зато я любил прогулки на природе, и страсть к путешествиям мне тоже явно передалась по наследству. Когда стал старше, дедушка иногда брал меня в свои поездки, и это было для меня большим счастьем. Многие места я посетил лишь благодаря ему. То, как он относился к людям и как люди относились к дедушке, заставляло меня любить его еще больше. Он всегда пытался вникнуть в суть проблемы и по возможности помочь.

Так получилось, что я несколько раз в разное время спрашивал у дедушки, счастлив ли он. И он всегда отвечал утвердительно. Он говорил, что счастлив, поскольку не потерялся когда-то, в раннем детстве, в джунглях Австралии, счастлив, что выжил во время войны и война закончилась, счастлив, что всю жизнь мог заниматься любимым делом. Он считал себя по-настоящему счастливым человеком. ■

# Австралия помнит

Академик Е.М.Дианов

Научный центр волоконной оптики РАН

Отмечая 100-летие А.М.Прохорова, хочется обратиться к самому началу — рождению Александра Михайловича на другом континенте, в далекой Австралии, и первым семи годам жизни, проведенным там. Как полагают многие психологи, личность ребенка в значительной степени формируется в первые пять-шесть лет жизни. Сам Александр Михайлович, по свидетельству его супруги Галины Алексеевны, всегда считал, что рождение и раннее детство в Австралии предопределили всю его дальнейшую судьбу.

В июле 2005 г. я оказался в Сиднее на конференции по волоконной оптике и после ее окончания смог побывать в штате Квинсленд, в местах, связанных с жизнью Прохорова. Компанию мне составил бывший сотрудник Научного центра волоконной оптики (НЦВО) РАН профессор Петр Георгиевич Казанский, работающий сейчас в Саутгемптонском университете (Великобритания). Большую помощь в организации поездки в Квинсленд оказал другой бывший сотрудник НЦВО РАН, Дмитрий Степанов, живущий в Австралии. Он выяснил, что мемориальная доска, посвященная Прохорову, находится на территории Исследовательского центра тропического леса (CSIRO TFRC — Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Tropical Forest Research Centre) в Атертоне (Atherton). По поводу нашего визита Степанов обратился к главному научному сотруднику CSIRO TFRC Давиду Хильберту. Тот любезно пригласил нас посетить Центр и подробно объяснил, как до него добраться. Но прежде чем рассказать о нашем путешествии, я коротко напомню обстоятельства, которые привели семью Прохоровых в Австралию.

Отец Александра Михайловича, Михаил Иванович Прохоров, профессиональный революционер, был в 1911 г. сослан на вечное поселение в Сибирь. Мать — Мария Ивановна — поехала вслед за мужем. В 1912 г. Прохоровым вместе с двумя малолетними дочерьми, Клавдией и Валентиной, удалось сбежать из ссылки и перебраться в Австралию. Они попали в штат Квинсленд, власти которого поощряли приезд мигрантов со всего мира, чтобы поселенцы осваивали пустующие земли, представлявшие собой девственный тропический лес. Вновь приехавшим предлагались на льготных условиях участки площадью 150 акров с подъездной дорогой, если люди соглашались жить и работать на

ферме по крайней мере пять лет. Сначала Михаил Иванович сменил несколько видов деятельности: был плотником, модельщиком и т.д. Но когда в семье родилась еще одна дочь, Евгения, родители решили стать фермерами. Они выбрали участок в округе Гадгарра (Gadgarra) на юго-востоке Атертонского плоскогорья. Там уже существовала небольшая русская колония, в которую входили и политические эмигранты. Здесь у супругов 11 июля 1916 г. родился сын Александр. Ферма Прохоровых находилась недалеко от местечка Бутчерс Крик (Butchers Creek), где была школа. В нее-то маленький Саша и ходил вместе со своими сестрами.

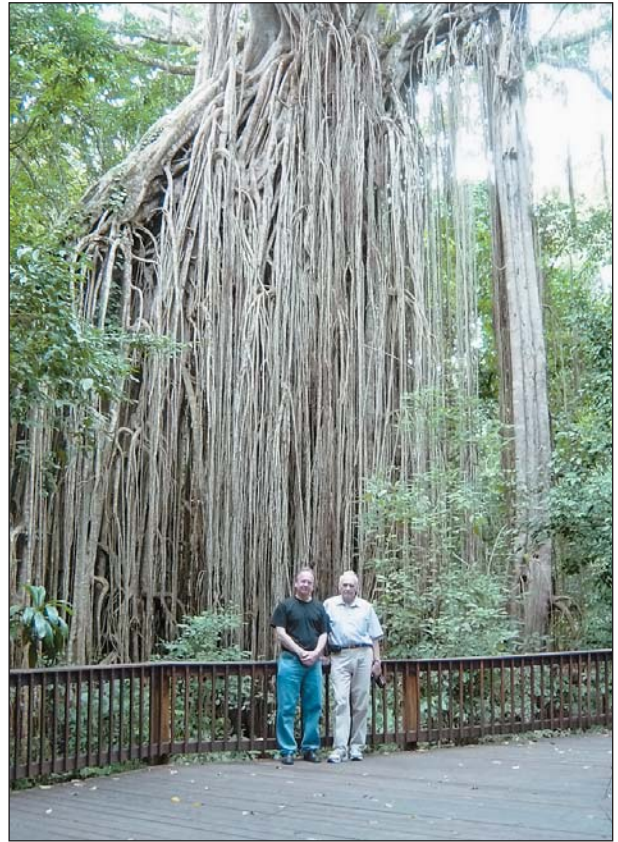
Свидетельства тех лет описывают жизнь российских поселенцев как исключительно тяжелую и совершенно непохожую на оставленную на родине. Эмигранты, среди которых были профессора, юристы, рабочие, пытались выжить в непривычном тропическом климате: вырубали лес, засевали землю, ухаживали за домашними животными. Несомненно, такие суровые условия жизни должны были сильно повлиять на формирование характера юного Прохорова. В 1923 г., после неожиданной смерти от воспаления легких старшей дочери Клавдии, семья Прохоровых возвращается уже в Советскую Россию, где бывшим политэмигрантам пока ничто не угрожало.

Итак, после окончания конференции в Сиднее мы прилетели в город Кейрнс (Cairns), взяли напрокат автомобиль и отправились в Атертон. Этот небольшой городок расположен на плоскогорье с одноименным названием, на высоте 700 м над ур. м. Хотелось бы отметить живописную природу Атертонского плоскогорья, которое имеет вулканическое происхождение. На до сих пор малонаселенной открытой холмистой местности, окаймленной грядой невысоких гор, много озер и водопадов, среди них — известный водопад Милаа-Милаа (Millaa Millaa). Живописные участки тропического леса изобилуют деревьями необычного вида, — такими, например, как дерево-занавес. По пути нам попалась ферма, на которой разводят редких животных и птиц, в том числе коала.

К вечеру мы добрались до Атертона и остановились в мотеле с одноименным названием, а в Исследовательский центр тропического леса отправились на следующее утро. Поскольку мы заранее предупредили о нашем приезде, нас ждали. Научные сотрудники Центра с воодушевлением отнеслись к нашему приезду в Атертон — чувствовалось, они гордятся тем, что нобелевский лауреат Прохо-



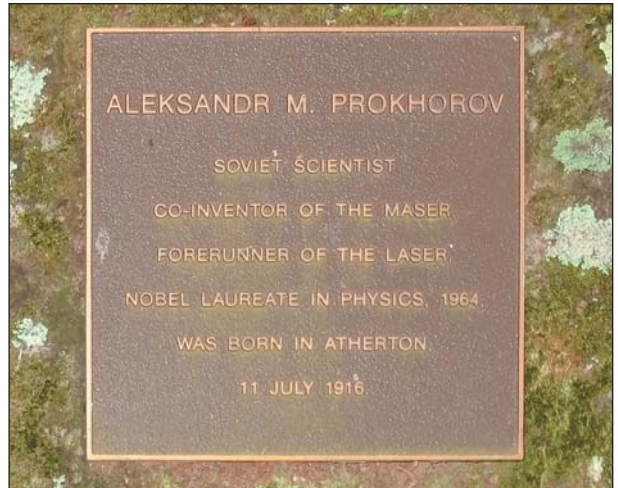
Водопад Милаа-Милаа.



Дерево-занавес.

ров родился в этих краях и что мемориальная доска расположена в их Центре. Вблизи административного здания мы увидели небольшой камень с прикрепленной к нему мемориальной доской. В Центре хранится копия свидетельства о рождении Александра Михайловича, из которого следует, что тот родился в Пирамоне (Peeramon, Russell Road). Сотрудники сообщили нам ценные сведения:

оказывается, ферма Прохоровых находилась не в Пирамоне, а вблизи местечка Бутчерс Крик, Пирамон же — просто ближайший административный центр. Вооруженные такой информацией, мы поехали туда. Пирамон состоит всего лишь из нескольких зданий, самое знаменитое из которых — дом, в котором расположен старейший в Австралии паб (Historic Pub, 1908 г.). Колоритная



Камень с мемориальной доской А.М.Прохорова и сама мемориальная доска.



Вход в школу в Бутчерс Крике, где начинал учиться Саша Прохоров, и здание школы.

ретро-обстановка в пабе включает в себя большую коллекцию старинных телефонных аппаратов.

Из Пирамона мы отправились искать местечко Бутчерс Крик, расположенное недалеко от городка Маланда (Malanda). Мы нашли ту школу, в которой Александр Михайлович начинал учиться. Директор школы Сандра Камерон проявила искренний интерес к нашему посещению и подтвердила, что действительно в нескольких километрах отсюда находилась ферма Прохоровых и что Александр Михайлович здесь учился. Школа в Бутчерс Крике была открыта в 1913 г., о чем свидетельствовала табличка на камне, находящемся у входа в здание. Правда, никаких письменных подтверждений учебы Прохорова здесь не сохранилось из-за случившегося пожара.

Камерон рассказала нам, что информация об Александре Михайловиче есть в Историческом музее в находящейся западнее Маланде, но, к сожалению, музей уже закрылся, а мы должны были улететь в тот же день в Сидней. Мы покидали Квинсленд с ощущением, что соприкоснулись с необычной судьбой рожденного в Австралии нашего великого соотечественника Александра Михайловича Прохорова.

Посещение мест, связанных с рождением и первыми годами жизни Александра Михайловича, и общение с сотрудниками школы в Бутчерс Крике и Исследовательского центра тропического леса в Атертоне показали, что в Австралии (по крайней мере в Квинсленде) помнят и гордятся тем, что Прохоров родился в их стране.

После возвращения домой я продолжал общаться с директором школы Камерон и установил контакт с Генри Трантером из Исторического общества (Eacham Historical Society — EHS). Задача Исторического общества, организованного

в 1976 г. и расположенного в Маланде, — поощрение изучения местной истории, сбор и хранение материалов, связанных с историческими событиями. Поэтому понятен интерес этого общества к лауреату Нобелевской премии А.М.Прохорову, родившемуся в Квинсленде. Трантер сообщил мне, что они хотят вместе со школой в Бутчерс Крике и другими местными организациями отметить в 2006 г. 90-летие со дня рождения ученого и в том числе планируют изготовить и поместить в школе соответствующую мемориальную доску. По его просьбе я послал ему фотографии и некоторую информацию о научно-организационной деятельности Прохорова. В январе 2006 г. он прислал мне планируемый текст на мемориальной доске для обсуждения и возможной корректировки.

12 июля 2006 г. в школе Бутчерс Крика было организовано торжественное собрание, посвященное 90-летию юбилею А.М.Прохорова. На собрании присутствовали учителя и ученики школы, ее выпускники, сотрудники CSIRO TFRC и Исторического общества, местные политические деятели, теперешние владельцы фермы Прохоровых, пресса. Камерон прислала мне фотоотчет и рассказала о деталях этого мероприятия, которые демонстрируют устойчивое теплое отношение к памяти Александра Михайловича.

Я представил здесь несколько интересных фотографий, которые, я уверен, будут интересны читателям этой статьи.

Насколько мне известно, 100-летие со дня рождения А.М.Прохорова будет отмечаться в Австралии в августе 2016 г. в Атертоне, т.е. снова там, где он родился. Тамашние общины бережно хранят память о заметных событиях, связанных с историей родных мест.

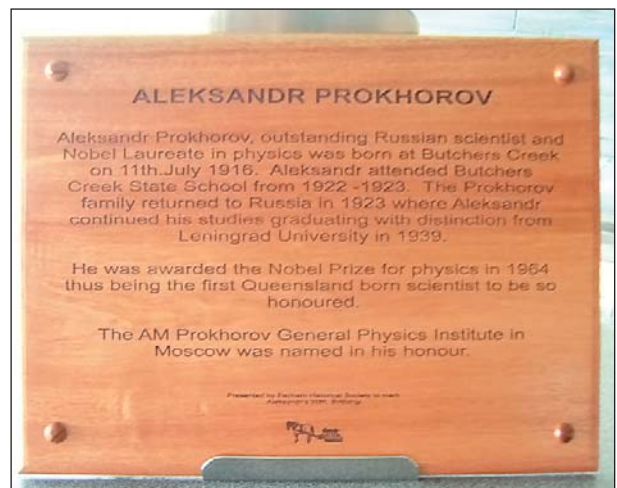




Директор школы Сандра Камерон (слева), зачитавшая приветствие Е.М.Дианова участникам торжественного собрания по случаю 90-летия со дня рождения А.М.Прохорова, предоставляет слово местной политической деятельнице Розе Ли Лонг. Видны два плаката. Плакат слева посвящен австралийским нобелевским лауреатам 2005 г., справа — Прохорову.



Школьницы выступают с небольшими докладами о нобелевских лауреатах, родившихся в Австралии.



Давид Хильберт (слева), рассказавший о научных результатах Прохорова и о роли науки в современном обществе, вместе с Брусом Кампбелом из Исторического общества, сделавшим памятник, открывают новую мемориальную доску на камне. Кампбел объяснил, как он использовал лазер при изготовлении доски, текст с которой виден на фотографии справа. Мемориальная доска установлена в школе 12 июля 2006 г.



Типичный для Австралии эпизод торжественных собраний — специально испеченный огромный торт с надписью, посвященной 90-летию со дня рождения Прохорова, готовится разрезать целая команда. Женщина (третья слева) и мужчина (шестой слева) — теперешние владельцы бывшей прохоровской фермы.

# ПРИРОДА

Ответственный секретарь  
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Научные редакторы  
**О.О.АСТАХОВА**

**М.Б.БУРЗИН**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

**М.Е.ХАЛИЗЕВА**

**О.И.ШУТОВА**

**А.О.ЯКИМЕНКО**

Литературный редактор  
**Е.Е.ЖУКОВА**

Художественный редактор  
**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией  
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Перевод:  
**С.В.ЧУДОВ**

Графика, верстка:  
**С.В.УСКОВ**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

Учредитель:  
Президиум Российской академии наук

Издатель: ФГУП «Академиздатцентр «Наука»  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Адрес редакции: 119049,  
Москва, Мароновский пер., 26  
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77  
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 17.05.2016  
Формат 60×88 1/8  
Бумага офсетная. Офсетная печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Тираж 366 экз.  
Заказ 245  
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Академиздатцентр «Наука»,  
(типография «Наука») 121099, Москва, Шубинский пер., 6

[www.ras.ru/publishing/nature.aspx](http://www.ras.ru/publishing/nature.aspx)

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



Практически ни одной недели не обходится без того, чтобы пресса не сообщила об аварии на той или иной шахте в различных уголках мира, причем почти всегда речь идет о трагедиях с человеческими жертвами. Взрывы газа на угольных шахтах не только уносят жизни десятков горняков и горноспасателей, но и наносят огромный ущерб экономике, в том числе в смежных отраслях.

В подавляющем большинстве случаев люди гибнут из-за взрывов метана, который концентрируется в какой-либо части шахты и легко воспламеняется. Нередко происходит серия взрывов — первый поднимает в воздух угольную пыль с пола и стенок выработки, а затем, если источник огня еще не погас, следует второй, самый мощный. Именно его жертвами становятся спасатели, спускающиеся на помощь шахтерам.

Мы предлагаем нашим читателям подборку из двух публикаций, рассказывающих о геологических опасностях в угольных шахтах и об уникальной методике борьбы с подземными взрывами метана.

#### ВЗРЫВЫ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ: КАК С НИМИ БОРОТЬСЯ

**Кизильштейн Л.Я.** Геологические опасности в угольных шахтах

**Иванов М.В.** Использование микроорганизмов при борьбе с метаном в угольных шахтах

