



06727051



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

С.Т. Беляев

МОЯ ПРОФЕССИЯ — ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 501
ББК 22.3

4402 - 2011

22.11.2016

24.05.2022

AOA

Верстка: А.Л.
Дизайн обло

С.Т. Беляев
Моя профес
М.: НИЦ «К

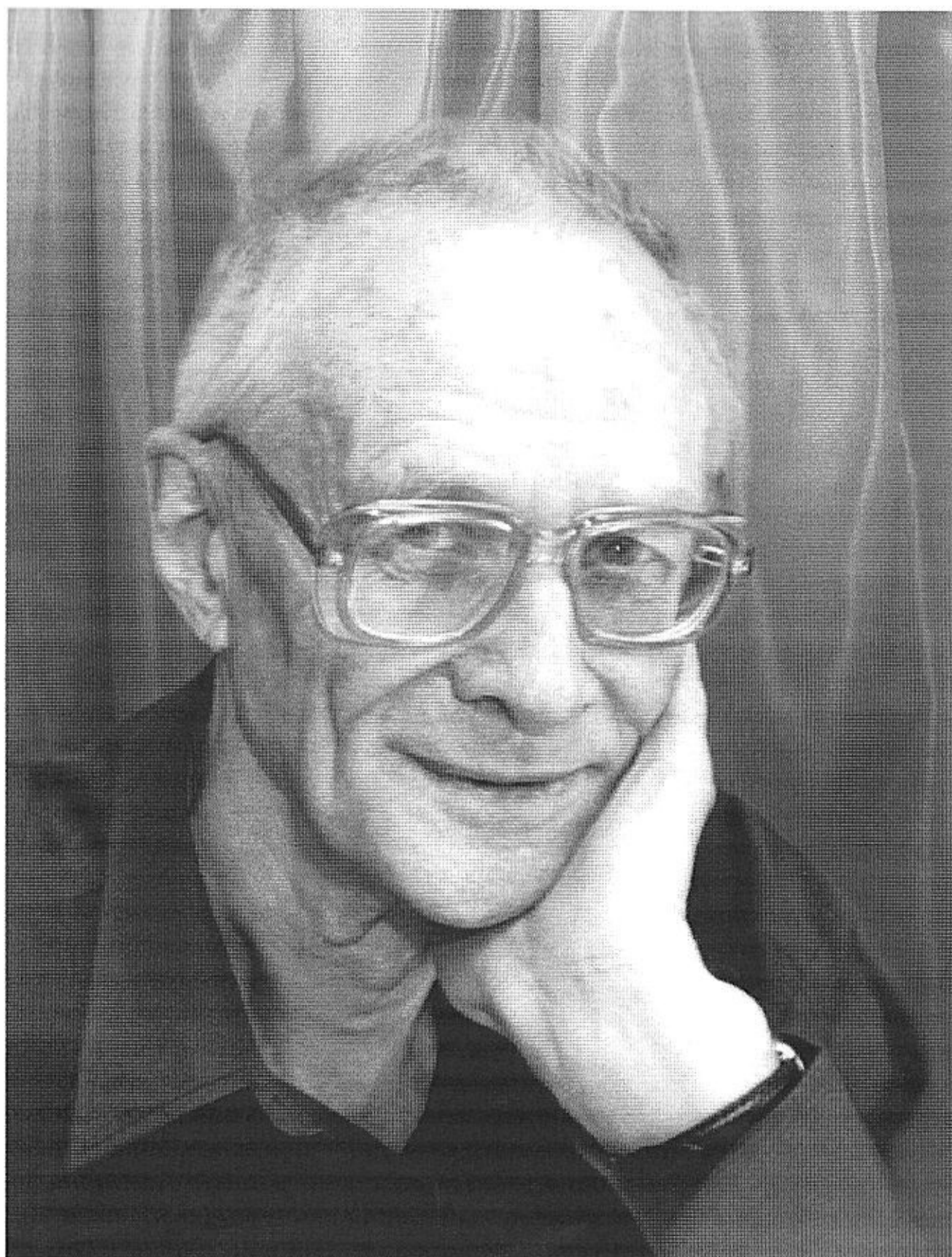
ISBN 978-5-9

В сборник с
автобиограф
твенной войн
обзорные ра
быле, статьи
размышлени
ся ученых (Л
Л.Д. Ландау).

входят его
ой Отечес
й физике),
и в Черно
разования,
выдающих
. Мигдале,

© Беляев С.Т., 2013
© НИЦ «Курчатовский институт», 2013

Москва
2013



Спартак Тимофеевич

БЕЛЯЕВ

4402-2014

ГПНТБ СО РАН
Гос. Публ. Науч.-тех.
библиотека

*Книжка: ЕДР
WAS*

Оглавление

Предыстория	5
Родители и школа	6
Моя война	7
Моя профессия — теоретическая физика	17
Введение	18
Мой первый контакт с наукой	18
Электронные пучки	20
Поляризованные ядра	21
Рождение квантовой теории поля	21
Теория неидеального бозе-газа	22
Теория сверхпроводимости	23
Куперовское спаривание в ядерной физике	25
Коллективные ядерные возбуждения	27
Ультрахолодные нейтроны	28
Эффект Соколова	29
Не теорфизиком единой	30
В Курчатовском институте	32
Курчатовский источник синхротронного излучения	33
Вспоминая Чернобыль	35
Проблемы Чернобыля	37
Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы	38
Предисловие к докладу Международного комитета	47
Decision process followed by the USSR up to 1991	55
Об образовании	65
Беседа с корреспондентом журнала «Юность»	66
Через три круга «Системы Физтеха»	78
К 100-летию Нильса Бора	85
The lessons of Niels Bohr	86
Нильс Бор и физика атомного ядра	98
Воспоминания	153
Недолгая, но яркая жизнь (О Г.И. Будкере)	154
В «центре сопротивления» (О М.А. Леонтовиче)	160

Воспоминания о Ю.Б. Румере	163
Вспоминая АБ (Об А.Б. Мигдале)	165
О Ландау: «Делать всё, что можно, но делать хорошо» . .	170
Список научных работ	177

Предыстория

Родители и школа

Мама, Терентьева Евдокия Тихоновна (1897–1989). Ее отец происходил из богатой нижегородской купеческой семьи, но, женившись против воли отца, был лишен наследства и обеспечивал свою семью с четырьмя детьми, работая в Арзамасе землемером. Там мама в 1915 г. сдала школьный экзамен на аттестат зрелости и поступила в Москве на медицинский факультет Высших женских курсов (в дальнейшем 2-й МГУ). Врач-педиатр. До войны работала в больнице им. Русакова; 4 года (1935–1939) — в советской больнице в Тегеране, куда я дважды (в 1936 и 1938 гг.) ездил к ней на летние каникулы. Во время войны — в прифронтовых эвакуогоспиталях. В 1943–1944 гг. — в Ленинграде (оздоровление блокадных детей). С 1945 г. до пенсии работала инспектором Минздрава РСФСР.

Отец, Беляев Тимофей Михайлович (1889–1945), из белорусских крестьян (Могилевской губернии, Костюковичского уезда, деревня Низки), младший из 14 детей в семье. Образование — рабфак. В мое время работал на небольших московских заводах начальником цеха или зам. директора. Умер довольно рано, в 56 лет.

Учился я в обычной школе № 315 на окраине Москвы (в Сокольниках). Хорошо успевал по всем предметам без особого предпочтения. Но в 9 класс к нам пришел новый учитель Исаак Яковлевич Танатар, который открыл мне красоту математики. Часто, опрашивая других учеников, он давал мне индивидуальные задания. Если я не решал их на уроке, то получал двойку, которую он исправлял на пятерку, если я приносил решение на следующий урок. По его настоятельной рекомендации (даже требованию) я посещал еженедельные школьные семинары в МГУ, участвовал в ежегодных Московских олимпиадах. (В 9 классе прошел во второй тур, а в 10 классе получил вторую премию.)

Встреча с И.Я. Танатаром — гениальным учителем и человеком — была для меня редкой удачей. Он кончил войну старшим офицером, преподавал в военной академии, но предпочел демобилизоваться и вернуться в нашу 315 школу, где я столкнулся с ним на первой послевоенной встрече выпускников школы. Он жаловался на новые школьные порядки: не разрешают давать сложные задачи («это понижает оценки успеваемости»). Не удивлен его переходу во 2-ю математическую спецшколу.

Школу я окончил в июне 1941 года, за неделю до начала войны.

Моя война

Впервые опубликовано в книге: "Воспоминания сотрудников Отделения физических наук Российской академии наук о Великой Отечественной войне 1941–1945 гг." — Москва, 2010. В ранее опубликованный текст внесены небольшие исправления.

Трудно возвращаться в свои военные годы. Далеки они, да и не старался их сохранять в своей памяти. Стойкая память о войне бывала жестока, многим не давала спокойно жить и работать, а некоторые из-за этой неотвязной памяти до срока уходили из жизни.

Моя память о войне сохранила только отдельные яркие пятна.

1941 год. Я заканчиваю московскую школу 10-летку. Через неделю после выпускного вечера началась война. В первые дни не было у нас ощущения трагичности. Ведь к войне серьезно готовились. Год назад открылись средние школы с авиационной и военно-морской специализацией. Из нашего класса некоторые перешли туда и приходили к нам, демонстрируя красивую форму. С прошлого года мальчишкам уже нельзя было сразу поступать в ВУЗ, только после армии. Мой сосед по квартире, окончивший нашу школу год назад, как раз приехал в двухнедельный отпуск из части под Ленинградом — и сразу собрался возвращаться назад в свою часть.

Многие из нашего класса сразу пошли в военкомат добровольцами. Там было не до нас. После нескольких отказов я устроился токарем на завод. В Москву война пришла через месяц. Начались постоянные налеты. Приходилось совмещать работу на заводе с дежурством на крышах при налетах.

Сегодня я с удивлением всматриваюсь в того молодого наивного мальчишку. Вот еще один эпизод из его жизни — в самом начале войны. В середине лета вызвали меня в райком комсомола и вручили повестку: завтра явиться по такому-то адресу. Зачем — они не знают... Большой «казенный дом», у входа толпа моих сверстников, примерно около сотни человек. Открылись двери и всех впустили. В несколько кабинетов стали вызывать по одному. Пришла моя очередь. Вхожу. Сидят два полковника. Немолодые, интеллигентные лица. Листают мое личное дело, задали несколько вопросов и отпустили. Примерно через час всех пригласили в большой зал. Разместились. После этого встает офицер с ромбами и говорит: «Все вы зачислены студентами в Военный институт иностранных языков. Кто не хочет, может отказаться». Одна рука поднялась. «Ваша фамилия?» — Ответ. Офицер листает бумаги, — «Вы свободны». Поднимаю руку я, называю фамилию. Шуршат бумаги, и в ответ: «А Вас мы не отпустим». Собрание кончилось, Шум обсуждения планов... А я думаю, что делать. Наконец решаюсь и вхожу в кабинет, где проходило собеседование. Те же полковники. Я: «... язык это не мое дело, ... мое будущее я вижу в математике...». Они спокойно

слушают, затем один с усталостью и состраданием: «Сынок, какая сейчас математика, ведь на фронт пойдешь...» — «Ну и пойду!» Отпустили...

Продолжал наведываться в военкомат. Наконец в августе получил направление в 55 Отдельную Специальную Радиороту Разведуправления Генштаба. Она располагалась в старых Чернышевских казармах почти в центре Москвы.

Курсантами роты были выпускники школ, студенты вузов, как парни, так и девушки. Учили нас приему и передаче морзянки, радиотехнике, использованию миниатюрной радиоаппаратуры. Занятия были очень интенсивные, по 12–14 часов, и нас мало мучили строевой подготовкой.

Как мне стало известно уже в послевоенное время, мы были первым набором в только что организованное (директивой начальника Генерального Штаба) подразделение по подготовке разведчиков-радиостов. Подготовка была рассчитана на 3–4 месяца. За это время нужно было овладеть основами электро- и радио-техники, изучить азбуку Морзе, уметь передавать цифры со скоростью 60 и буквы 70 знаков в минуту, а также принимать соответственно 80 и 70 знаков в минуту, знать и уметь практически применять международный «Q-код» и радиолобительский жаргон.

Во второй половине октября (время паники в Москве) нас направили на земляные работы, но вскоре вернули в Москву и отправили эшелонами в Горький. Там нас разместили в школе, и все время уходило, в основном, на элементарное обустройство для жизни и занятий.

6 ноября вечером все сидели перед громкоговорителем и слушали доклад Сталина, когда вошел дежурный офицер и зачитал небольшой список вызываемых к командиру части. Тот приказал нам получить документы и пайки и сообщил, что завтра мы отправляемся на Южный фронт. Наутро мы, восемь свежее испеченных сержантов, из них три девушки, отправились в путешествие. Где можно — поездом, где — попутными машинами, ожидая их у военных регулировочных постов.

Это было начало моего армейского пути — до победы. Но мои армейские годы не кончились и после победы: только в январе 1946 г. я был откомандирован из части (стоявшей в окрестности Варшавы) в «12 ОПРОС», Отдельный Полк Резерва Офицерского Состава, располагавшийся недалеко от Гомеля. Здесь должна определяться дальнейшая судьба прибывающих из-за рубежа офицеров — направление в военные округа или демобилизация. Личные дела идут спец-почтой и запаздывают, поэтому всем дают двухнедельный отпуск. И хотя почти все запаздывают на две-три недели (получая «10 суток ареста», т.е. -15 % денежного содержания), но почта идет еще медленнее.

Все нервно ждут решения своей судьбы. Большой спортивный зал, плотно уставленный двухэтажными кроватями, днем постоянно гудит. В основном боятся демобилизации. Молодые ребята, танкисты, артиллеристы, капитаны, майоры, много повидавшие, привыкшие уже к почету и уважению, но не имеющие гражданской профес-

сии, а часто и места, где приткнуться. Их можно понять. Но с другой стороны... Знакомлюсь с соседом по койке. Немолодой капитан, был учителем, трое детей. Не демобилизуют. Я: «Как же так, ведь есть приказ: учителей и студентов отпускать в первую очередь» — «Говорят, связисты очень нужны». Для меня это удар. Я так надеялся, что удастся, наконец, поступить в университет.

В Москве я провел целый месяц. Проходя мимо Политехнического музея, увидел вывеску: «Заочный политехнический институт». Зашел, поговорил и в тот же день поступил. До отъезда успел выполнить все задания за первый семестр и сдал их. Возвратился в ОПРОС, личное дело еще не пришло. И я решил, что надо действовать. Еду в Гомель в штаб округа с рапортом примерно такого содержания: хотя я и младший лейтенант, но училища не кончал, хотя радист, но армейской связи не знаю, а только спецсвязь разведки, а с другой стороны, я студент и хочу демобилизоваться. Входя в кабинет командующего, я привел себя в надлежащий вид: надел очки, ссутулился, собрал гимнастерку на животе. Он прочитал, посмотрел на меня, и, ничего не спрашивая, что-то написал на моей бумаге и отдал мне. За дверью я прочитал: «демобилизовать». Удивительно, что при возвращении в ОПРОС меня окликнули из канцелярии: «Твое дело уже пришло!», на что я закричал: «Мне оно ни к чему, я демобилизуюсь», и подумал: «как вовремя я съездил, видно судьба».

Между двумя описанными событиями прошла моя армейская жизнь. В 1946 г. я стал студентом Физфака МГУ и, восполняя потерянные годы, жадно впитывал новые знания. Но в трудные послевоенное время воспоминания о войне не отпускали. Были встречи с однопольчанами, с немногими вернувшимися одноклассниками. Видел, как многие не могут оторваться от воспоминаний и активно включиться в новую жизнь. И созрело решение: забыть о тех годах, жить так, как будто их не было. Поэтому сегодня и летописец из меня плохой, память сохранила лишь отдельные эпизоды.

Прошел я всю войну «радиостом-разведчиком». Специальность редкая, потому немного пояснений. Забрасываемые через фронт группы разведчиков, взрывников для связи включали радиста с миниатюрной аппаратурой: приемо-передатчик морзянки «Север» с комплектом батарей в двух сумках. Аппаратура эта была очень надежна, но маломощна, с гарантированным радиусом приема 100–200 километров (хотя иногда удавалось связываться и за тысячу километров). На нашей стороне связь с этими группами осуществляли специальные подвижные радиоузлы при развед-отделах фронтовых штабов.

В ноябре 1941 г. наша сержантская команда прибыла в радиоузел развед-отдела Южного фронта, располагавшемся в Донбассе, между Каменском и Миллерово. Радиоузел (кроме общих технических, штабных и хозяйственных подразделений) состоял из отдельных радиостанций. Каждая в деревянной будке, смонтированной на грузовике. Впереди встроенный стол с приемником и передатчиком с местом для радиста, сбоку лавки-кровати. Небольшая печка-буржуйка.

Электропитание — от выносного движка. Рядом с машиной устанавливается антенная мачта на тросовых растяжках. Команда такой передвижной станции — 5 человек: начальник, он же первый радист, второй радист, механик-моторист, шофер и стрелок-охранник. За очень короткое время все убирается внутрь и станция готова к передвижению.

Радиоаппаратура резко контрастировала с примитивной обстановкой: большого размера новейшие американские передатчик и приемник (помню марку: «хаммерлунд»). Дело в том, что сеть разведывательных радиостанций существовала и до войны. Наш центр раньше располагался в Одессе, так что в нем сохранились еще опытные «кадровые специалисты». Так, я попал к такому начальнику радиостанции, старшему лейтенанту Будкову. Стройный, шерстяная гимнастерка в офицерских ремнях, хромовые сапожки. (Какой контраст с нашими ботинками и обмотками.)

Новые радисты, прибывавшие в часть, после работы-стажировки часто отзывались для «спецзаданий», включения в группы для заброски в тыл врага. Они переходили в распоряжение развед-отдела и обратно на радиоузел, как правило, не возвращались. Каждый из нас ждал своего часа. Но по воле случая меня из радиоузла не отпустили.

Примерно за месяц до нашего прибытия в часть через линию фронта была заброшена группа во главе с офицером развед-отдела с очень важным заданием. Но больше месяца группа на связь не выходила, и уже считали, что задание сорвалось (что бывало не очень редко). Каждой группе назначались свои позывные и определенное расписание для первого выхода в эфир, обычно два-три раза в разное время суток. В это время их вызывали и ловили ответный сигнал в течение получаса. Связь с этой важной группой была поручена Будкову, моему начальнику, как лучшему специалисту части. Но однажды он решил отлучиться на какое-то амурное дело, сказав мне: «Поработай, хотя вряд ли он появится».

Во время сеанса я вдруг поймал очень слабый, но явно нужный сигнал и связь установилась. Зазвонил телефон со станции контрольного слежения (где для контроля только слушали на нескольких приемниках, но передатчиков там не было), спросили, слышу ли я. Я ответил, что связь уже установлена. Я начал принимать радиogramму. Слышимость была очень плохая, приходилось запрашивать повторения, но работа продвигалась. Вдруг открывается дверь и влетает полковник, командир части (это я понял уже потом), и кричит: «Где Будков?» Я в ответ: «Не мешайте работать» и даже мата добавил. Он сел со мной рядом и тихо сидел до конца сеанса. После схватил принятую радиogramму и побежал к шифровальщикам. Потом я понял, что прием прошел успешно. После этого меня оставили радистом в команде Будкова.

Зима 1941–42 гг. была у нас на Южном фронте относительно спокойной. Периодические перестрелки были слышны у наших северных соседей. А мы наблюдали редкое явление — сплошные потоки, прямо

река мышей. Говорили, что их гонят немцы. По ночам мыши забрались в лобные ямы, даже в передвижные кухонные котлы, и там умирали. Это принесло эпидемию туляремии. Я ее также не избежал, попал в госпиталь. Выписали меня недели через три, и благодаря относительной стабильности фронта я смог вернуться в свою часть. Приступив к работе, увидел в расписании много новых позывных. Очевидно, готовилось наступление. Но главные события развернулись у соседей, на Юго-Западном фронте, где успешное вначале наступление кончилось катастрофой под Харьковом. (Помню, как долго проходила мимо толпа вырвавшихся из окружения.)

Вскоре началось наступление немцев и на нашем фронте, вдоль Дона. В июле 1942 г. положение, видимо, стало совсем плохим, и штабу фронта было приказано перебазироваться за Дон. Наш радиоузел обычно перебазировался в две очереди, чтобы не прерывать связи. Поэтому командир объявил порядок: комиссар с основным «хозяйством» отправляются первыми, а он с половиной радиостанций (в том числе и нашей) остается до передачи связи первой группе.

Время шло, никаких вестей от первой группы не было, а положение становилось все тревожнее. Тогда командир приказал двум станциям остаться, а с остальными отправился на переправу с обещанием взять связь на себя как можно быстрее. Мы продолжали работать и следить, что происходит вокруг. Звуки разрывов хотя и медленно, но приближались. Никаких сигналов от наших групп не было. Было решено опять разделить: наша станция остается, другая перебазируется и при первой возможности берет связь на себя и дает нам знать. В нашей команде остались Будков, я, моторист, шофер и техник радиомастерской нашего узла. Он не имел прямых обязанностей на станции и мог позволить себе отдельную программу по ознакомлению с ближайшим поселком. Через какое-то время он вернулся за Будковым.

Возвратились они к вечеру, распространяя резкий сивушный запах. Скоро оказалось, что пили они какую-то отраву. Техник вскоре оправился, а Будков не приходил в сознание. Я понял, что остался за старшего (хотя по возрасту был самым младшим). Мы стояли прямо на берегу какой-то реки, притоке Дона. Противоположный берег очень высокий и крутой, наш более пологий и заросший деревьями. От них до воды метров пятьдесят. На этом открытом берегу и развернута наша мачта рядом с машиной. Время шло, никаких сигналов от наших групп. На круче противоположного берега появились два немецких танка. Один раз выстрелили и исчезли. По-видимому, разведка.

Наше расположение на открытом берегу было явно опасно. Решил, что надо поискать более укрытое место. Будкову устроили лежанку под боковой лавкой. Быстро свернулись и поехали. Темнело, нашли место среди большого фруктового сада, развернулись. Работал по расписанию, регулярно проверяя, есть ли сигналы от наших. Пока ничего ни от кого. Вдруг в темноте яркий свет фонаря, и появляется полковник или генерал (судя по барашковой папахе) с дву-

мя автоматчиками. «Кто такие?» Я объяснил. «Никуда не поедешь. У меня связи совсем нет. Будешь работать на меня.» Я объясняю, что в общевойсковую связь войти не могу. «С кем можешь связаться?» — «Только с Москвой.» — «Хорошо, будешь передавать в Москву.» Оставил автоматчиков с приказом не выпускать. Через какое-то время приносят пачку радиограмм. Связался, передаю. Получил ответ, по-видимому, попало к адресату. Поспать пришлось очень мало, рано утром принесли новую пачку, потом еще... Только на следующий день к вечеру поток иссяк. Наконец можно передохнуть. Вышел из машины и увидел, что автоматчик крепко спит. Решение пришло сразу. «Уезжаем!» Быстро свернулись и выехали.

Стали искать переправу через Дон. К рассвету выехали к понтонной переправе. Понтон разбит, восстанавливается саперами. Огромное поле у берега все в шахматном порядке покрыто машинами, лошадиными повозками. Ждут. Наконец понтон восстановлен, машины и повозки выстраиваются в очередь, медленно продвигаются. Но через некоторое время появляются немецкие бомбардировщики. Понтон снова разбит, застрявшие на нем машины сбрасывают в воду, и работа саперов начинается снова. Наши самолеты появляются лишь после отлета немцев. Покружат, посмотрят и улетают не дожидаясь следующего налета. Уже к концу дня понимаем, что ждать бесполезно. Наш радиотехник предлагает ехать в Ростов. Он сам ростовчанин, говорит, что поможет разобраться.

В Ростове все мосты разбиты, переправы понтонные. Многокилометровая очередь начинается при въезде в город. Команды регулировщиков с флажками пытаются поддерживать порядок. Оценив обстановку, наш радиотехник, стоя на внешней ступеньке рядом с шофером, направляет машину через какие-то пустынные переулки, и скоро мы выкатываемся прямо к переправе. До въезда на понтон всего метров тридцать очень крутого спуска. Перепалка с регулировщиками: «Куда лезете, тормозите!» — «Тормоза не держат!»... Так или иначе, въезжаем на понтон. Быстро темнеет, надеемся, что налеты будут реже, и мы успеем переправиться. Увидели сброшенные самолетом-разведчиком осветительные факелы, когда уже съезжали с понтона. Уже слышен шум бомбардировщиков. Остановка, выскакиваем из машины, отбегаем метров на 20 и ложимся. Взрывается целый ковер бомб, но у нас все в порядке. Возвращаемся к машине. Не заводится. Вижу, что шофер в стрессе, руки трясутся. Пожилого одессита можно понять. Стараюсь успокоить. Вновь налет, но теперь уже есть опыт. Обошлось, едем дальше. Оказалось, что предстоит еще одна переправа через проток, но она оказалась много проще. Через несколько километров остановились на привал. Силы на исходе, надо немного поспать. Утром ставим антенну, удалось связаться со штабом. Узнали пункт сбора нашего радиоузла. (Оказывается, он еще не собрался!)

Сверяюсь с картой. Километров 300 до Сальских степей, а затем на юг, полдороги до Краснодара. Могли бы добраться за сутки-двое, но бензин на исходе, продуктов почти нет. Выехали на дорогу. По

ней почти сплошной поток: машины, конные повозки, пешие толпы в форме и без, гонят скот. Стараемся продвигаться быстрее. Когда попадаются какие-то строения, сворачиваем к ним. Передохнуть и осмотреться. Часто дома добротны, но почти везде пусто. Всюду много спелых абрикосов, на земле, на крышах. Встречались птицефабрики, молочные заводы с бидонами молока. И никого вокруг. На счастье повстречалась и заброшенная автобаза, где запаслись горючим. Конечно, абрикосы с молоком не лучшее сочетание, но ничего другого не было. Зато на нашего Будкова молоко хорошо действовало, он быстро выправлялся. Когда мы прибыли на место сбора, он выглядел уже настоящим начальником.

Сбор оказался далеко не полным. Хотя некоторые группы еще подъезжали, но уже знали о больших потерях при переправе... Прибыл шофер хозяйственной части, выкатил большой молочный бидон и объявил, что подфартило найти спирт-завод. «Приходите с посудой, буду разливать». Выстроилась очередь с котелками. Процедура была очень колоритной. Шофер, высокий крепкий мужик, черпал большой кружкой из бидона, выливал в очередной котелок, а остаток выпивал сам. Когда очередь уже кончалась, он заявил: «Баста, я уже пьян».

Я считал, что уклоняться не по-мужски, и также встал в очередь. Спирт был неразведенный, и как его следует пить, я и понятия не имел, так как до этого даже водки никогда не пробовал. Я отошел в сторонку, чтобы никто не видел, и выпил довольно много. Не буду описывать, что было дальше, но мутило меня сильно. Ненадолго пришел в себя, услышав выстрелы. Это приехал наш комиссар, кричал: «Рядом немецкий десант, а вы пьянку устроили. Срочно отъезжаем!» — и прострелил бидон со спиртом. Все стали быстро собираться, но я уже отключился... Видно, до настоящего мужика я еще не дорос.

Время еще будет, до победы оставалось почти три года.

Конец лета и осень 1942 г. были очень трудными. Немцы форсировали Дон и наступали на Армавир, Краснодар, Керченский пролив. Наш фронт, теперь уже Северо-Кавказский, постоянно отступал. Наш радиоузел был постоянно на колесах. Каждые 1–2 дня мы меняли дислокацию. Понимали, что на фронте тяжело, но судя по плотному расписанию у радистов наш развед-отдел работал неплохо. Понятно: при отступлении не надо было сбрасывать разведгруппы с самолетов, что всегда сложно и опасно. Их просто оставляли при отходе.

Скоро мы почувствовали, что немцы прорвались и к Северному Кавказу. Наш узел разделили, и одну часть было решено направить в распоряжение Северной группы войск Закавказского фронта. По-видимому, требовалась быстрая передислокация, без развертывания в пути, а для связи со «своими» разведгруппами было решено временно оставить одну радиостанцию. Оставили нашу станцию, и меня, единственного радиста, назначили начальником. Немцы продвигались так быстро, что к тому времени, когда я передал связь

радиоузлу, расположившемся в районе Моздока, дорога туда была уже перерезана — немцы вышли к Кавказскому хребту. Мне было приказано добираться в обход хребта с юга. Предстояла дорога через Туапсе, Сухуми, Тбилиси и дальше через военно-грузинскую дорогу на Нальчик. Я получил все необходимые бумаги, талоны на продовольствие и бензин, указание прибыть в штаб Закавказского фронта в Тбилиси, где меня снабдят всем на оставшуюся дорогу. Казалось, все прекрасно и можно считать, что получили нежданый отпуск. Но все оказалось не так просто.

Совсем недавно вышло известное постановление «Ни шагу назад». Его зачитывали нам на общем построении части. Впечатление было шоковое. Заград-отряды, ... штрафбаты, ... вплоть до расстрела на месте...

Вот заград-отряд и оказался первой преградой на нашем пути. Сначала, даже не разбираясь в наших бумагах, нас загнали на стоянку за колочей проволокой, где уже накопилось много всего. Часовые говорили: «Придет командир — пусть разбирается». Первый командир повертел наши бумаги и сказал, что он решить не может, надо ждать старшего. Следующий сказал, что нас он может отпустить, но машина останется у них. Шли часы за часами. Когда появился старший офицер, я стал говорить, что они срывают важное задание и будут за это отвечать. Потребовал, чтобы они связались со штабом фронта в Тбилиси. Наконец появился офицер с полномочиями на наше освобождение. И даже приказал снабдить нас продовольственным пайком (целый день мы голодали, а время было уже позднее).

Дальнейшая дорога Туапсе — Сочи — Сухуми — Тбилиси в памяти не сохранилась, видимо, прошла без приключений. Штаб Закавказского фронта в Тбилиси оказался в самом центре на необычно чистой улице. И наша припаркованная потертая машина резко контрастировала с роскошным зданием штаба.

Военно-грузинская дорога была главным путем снабжения Северной группы войск. Машины, повозки шли почти сплошным потоком. Немецкая авиация была мало активна, поэтому добрались мы без осложнений. Нашу часть мы нашли в районе Орджоникидзе. Было много новых лиц. Узнал, что в Коджори (окрестности Тбилиси) еще до войны был такой же, как в Одессе, разведывательный радиоузел Генштаба. Часть его и вошла в нашу общую теперь команду.

Наступление немцев на Кавказе еще продолжалось, хотя его активность спадала, они перебрасывали свои части к Сталинграду. Так что отступление наше кончилось. Далеко мы откатились за 1942 год. Но, видимо, и отступая, наша часть, радиоузел с развед-отделом, внесли свой вклад. В конце года даже пришли награды. Мне вручили медаль «За боевые заслуги».

Дальше будем двигаться только вперед. Но это уже другая история.

После Сталинградской перегруппировки фронтов нас передали в Отдельную Приморскую армию и после освобождения Краснодара, в феврале 1943 г., мы разместились в его окрестностях. Думали нена-

долго, после Сталинграда ждали быстрого продвижения. А простояли больше года. Бои на побережье были тяжелыми, с неудачными десантами. Напряженную обстановку мы чувствовали и по работе наших разведгрупп. В расписании их появлялось много, но не все выходило в эфир, да и работали они недолго... Крым и Севастополь освободили только в мае 1944 г., когда другие фронты уже переходили нашу границу.

В Крыму нас разместили в Евпатории. Город был почти пуст с минными полями вдоль берега, которыми занимались саперы. Ждали переброски на другие фронты, но задачу нам поставили необычную. Убрать урожай, оставшийся после выселения крымских татар. (У нас в части был крымский татарин, все звали его Тохтамыш, командир моторизованной роты, водил ее часто рейдами по немецким тылам, человек легендарной храбрости. И его семью тоже выселили, даже вмешательство командующего армией не помогло.) Пока солдаты в районе Джанкоя убирали урожай, с офицерами проводили занятия. (Я, хотя и старшина, но на офицерской должности, тоже присутствовал.) Обучали румынскому языку, знакомили с историей страны. Понимали, что готовится десант в Румынию. Но пока урожай убирали, Румыния капитулировала. Наше будущее снова стало неясным.

Всю нашу часть, развед-отдел вместе с радиостанциями, погрузили на платформы и отправили в резерв главного командования в Москву. На сортировочной станции Павелецкой дороги простояли мы недели две, пока не получили назначение: часть целиком (развед-отдел и радиоузел) передается Польской Народной Армии. Состав разгрузился около Люблина, и началась совсем другая история.

Сегодня, зная подоплеку сталинской политики с целью будущей «коммунизации» Польши, можно понять и наше новое назначение. Вливание нашей части позволяло превратить «Дивизию Костюшко» в «Польскую Народную Армию». Никаких изменений в работе нашего радиоузла заметно не было. Только в развед-отделе можно было иногда встретить офицера в польской форме. Новое в нашей работе возникало из-за быстрого продвижения фронта. Надо было оперативно следовать за ним, быть ближе к заброшенным разведгруппам. Вся часть так оперативно двигаться не могла. Задача возлагалась на передвижные радиостанции.

Так случилось, что наиболее «подвижной» оказалась моя станция. Мы почти все время были в разъездах, отработалась и определенная тактика. Цели нам указывали самые общие, только направление и район. С одной стороны, желательно было держаться ближе к линии фронта, но подальше от скопления войск, с воздушными налетами и помехами от армейской связи. Контактировать с армейскими штабами приходилось для заправки бензином и продовольствием. А в остальном мы были в своего рода автономном плавании. Скоро научились выбирать оптимальные места для развертывания. Открытое

место опасно: рация — хорошая цель при авианалетах. Очень хороши дома — антенну можно развернуть без мачты, да и аппаратуру перенести внутрь и работать с удобствами.

На немецкой территории случались и курьезные случаи. Так, остановились мы на одиноко стоящем хуторе, довольно богатом. Дом, напротив большой сарай. В одной половине доверху сено, в другой — две лошади. В доме три женщины разного поколения, просто дрожат от страха. Стараюсь успокоить (с немцем у меня тогда не было проблем, за что благодарен своей школьной учительнице). Просим комнату, где переночевать. На ночь выставляю часового снаружи. На рассвете вдруг выстрел. Выскакиваю и вижу уже далеко уходящего верхового. Оказалось, что хозяин хутора дезертировал из отступающей армии и прятался в сарае. Наш часовой услышал какой-то шум, пошел в сарай и спугнул хозяина, который оказался хорошим наездником.

Много пришлось проехать и увидеть. Но в памяти остались только несколько ярких пятен.

... Полностью превращенная в пыль Маршалковска, главная улица Варшавы...

... Зееловские высоты после нашего мощнейшего артобстрела: красная пустыня, как-то сохранившаяся поваленная кирпичная колонна, и на ней сидят две женщины во всем черном, утирающие слезы...

... Франкфурт-на-Одере, новая польско-германская граница, дорога к пограничному шлагбауму. Мы работаем в высоком доме с окнами на эту дорогу. Виден поток женщин, стариков, детей. Везут тележки с домашними вещами, несут мешки, сумки. Это немцы, выселяемые из своих мест, отходящих Польше. И видно, как почти все у них отбирает толпа мародеров, стоящая вдоль дороги...

... Берлин, дней пять после штурма. Пыль и развалины. В Рейхстаге забираюсь на стену и пишу: «Развалинами Берлина удовлетворен. Беляев, Москва». Эту надпись скопировали на суперобложке давно вышедшей книги «Штурм Берлина». Стараюсь понять себя тогдашнего. Но сегодня я стыжусь этой надписи.

Моя профессия — теоретическая физика

Введение

Моя профессия — теоретическая физика, задача которой — исследование физических явлений и законов природы методами математики. Понять явление для теоретика, работающего в определённой области физики, означает найти или создать адекватный математический метод его описания. Однако мне пришлось работать во многих областях, поэтому на основе собственного опыта я хочу на разных примерах рассказать о появлении новых направлений в науке, выборе задач и методов исследования. Мои размышления на эту тему вошли в статью [114]; здесь представлен расширенный ее вариант.

Мой первый контакт с наукой

Мой первый контакт с наукой относится к 1947 г., когда я, студент второго курса физфака МГУ, решил перейти (после сита предварительных собеседований) на второй курс только что открывшегося физико-технического факультета, где, кроме обычных лекций и семинаров, были дни практических занятий на «базах». Для нашей небольшой группы, состоявшей из 10 человек, обучавшихся по специальности «Строение вещества», такой базой стала Лаборатория № 2 Академии наук, она же Лаборатория измерительных приборов Академии наук (ЛИПАН), а ныне — Курчатовский институт.

К этому времени в ЛИПАНе были решены принципиальные научные задачи «урановой проблемы»: построен и запущен первый в стране реактор Ф-1 (декабрь 1946 г.); на этом реакторе наработано и выделено 25 мкг плутония, который был передан химикам для исследования свойств и отработки технологии его извлечения из облучённого уранового топлива. Осталось научное сопровождение пуска технологических заводов на базах. 29 августа 1949 г. было произведено испытание первой советской атомной бомбы.

Тем временем на площадке ЛИПАНа разворачивались широкие фундаментальные исследования.

После третьего курса я решил, что моё дело — теоретическая физика, а лучшее место для работы — руководимый А.Б. Мигдалом Теоретический сектор № 10. Успешно пройдя у Мигдала «собеседование», я официально стал стажёром. Сотрудников в секторе было немного, среди них такие яркие личности, как В.М. Галицкий, Б.Т. Гейликман, но особенную ноту творческой активности вносил Г.И. Будкер, часто обсуждая свои новые идеи, иногда далеко уво-

дящие от основной тематики и вообще от физики. (О колоритной обстановке в секторе Мигдала и его сотрудниках я потом написал в моих воспоминаниях о Г.И. Будкере — см. с. 154.)

Своим сотрудникам А.Б. (так все звали А.Б. Мигдала) не ставил каких-либо задач, поскольку считал, что главное — создать творческую атмосферу, а задача должна вызревать у каждого самостоятельно. И.В. Курчатов очень ценил Мигдала, его выбор задач и нетривиальность их решения. Поэтому сектору Мигдала было разрешено заниматься фундаментальной ядерной физикой. Основные дискуссии в секторе, кроме обсуждения проблем ядерной физики, относились к физике твёрдого тела, особенно к вопросам сверхпроводимости, а также к квантовой электродинамике. Лишь в особых случаях сектор привлекался к «авральным проблемам».

Мой опыт заставляет сделать заключение, что «авральные проблемы» регулярно возникают в науке и прерывают ее плавное течение взрывным развитием. Очередной аврал не заставил себя ждать. Весна 1951 г. Президент Аргентины Хуан Перрон объявил об осуществлении термоядерной реакции в дейтерии. О начале работ объявлено в США и Англии.

В ЛИПАНе — мобилизация научной элиты для решения «проблемы МТР (магнитного термоядерного реактора)». Привлечены И.Е. Тамм и А.Д. Сахаров (занятые в создании термоядерного оружия). Введена строгая секретность. Начал работать специальный семинар Л.А. Арцимовича и теоретический семинар М.А. Леонтовича. Вход только по спискам. Сектор Мигдала брошен на проблему МТР. Ходим на семинары, вникаем в проблему.

Так взрывным образом возникло мощное научно-техническое направление, результатов которого все ждут уже 60 лет.

Но мне не суждено было включиться в проблему МТР. Когда в январе 1952 г. я защитил диплом и пришёл в сектор № 10 ЛИПАНа уже штатным старшим лаборантом, М.А. Леонтович и А.Б. Мигдал пригласили меня на доверительный разговор и сообщили, что с Будкером беда — его лишили допуска и требуют уволить. Даже Курчатов не мог этому противостоять, но он пытается сохранить Будкера, аргументируя важностью его проекта — «релятивистского стабилизированного электронного пучка». Проект следует подтвердить серьёзной научной экспертизой, принять участие в которой Курчатов просил ведущих специалистов: И.Е. Тамма, В.А. Фока, Н.Н. Боголюбова, В.И. Векслера. Леонтович и Мигдал считают, что я должен отложить все остальные дела и помогать Будкеру (который был руководителем моего диплома).

Так «дело врачей» бросило меня в новую область физики, и наша совместная работа с Г. И. Будкером растянулась на несколько лет.

Идею Будкера можно представить следующим образом. Облако электронов — частиц с одинаковым зарядом — сразу разлетается. Если электроны движутся в пучке, то их отталкивание частично компенсируется притяжением их токов. Для очень быстрых — релятивистских — электронов компенсация оказывается практически

полной, достаточно лишь небольшого числа положительных ионов, чтобы отталкивание сменилось притяжением и произошло сжатие пучка. При определённых энергиях электронов и очень большом токе наступает полная стабилизация пучка, то есть сохранение его энергии и плотности. Осуществление этой идеи обещало революцию в ускорительной технике.

Никто из экспертов не опровергал существования стационарного состояния пучка. Сомнения касались его устойчивости при отклонениях от равновесия. Качественная аргументация Будкера не всегда убеждала, поэтому требовалось подтверждение путём решения кинетического уравнения.

Но оказалось, что релятивистского кинетического уравнения не существует. Мы нашли две статьи, где предлагались такие уравнения, но они оказались ошибочными. Поэтому нашей первой работой стала статья «Релятивистское кинетическое уравнение» [2], которую М.А. Леонтович представил для публикации в «Доклады АН СССР». (Этому уравнению посвящен специальный раздел в соответствующем томе курса Ландау–Лифшица.) Затем мы начали обсуждать возможные приближённые методы решений этого уравнения.

После смерти Сталина обстановка разрядилась, вопрос об увольнении Будкера был снят. По существу его проекта возражений у экспертов не возникло, поэтому уже рассматривался вопрос о начале экспериментальных работ. Трудности на этом пути были очевидны, но Курчатов знал Будкера и доверял его изобретательности, поэтому осенью 1953 г. в отделе Арцимовича была создана Лаборатория новых методов ускорения.

Будкер практически полностью переключился на создание коллектива лаборатории и планирование экспериментов, так что оформлением всех наших идей пришлось заняться мне. Я написал три большие статьи, в которых излагались новые методы решения задач для плазмы в сильных полях [3, 4, 5]. Затем уже без Будкера написал ещё две работы [6, 7], на основе которых в декабре 1955 г. защитил кандидатскую диссертацию¹.

Электронные пучки

В этот период лаборатория Будкера пополнялась как опытными специалистами, так и талантливой молодёжью, быстро разворачивались экспериментальные работы, появились первые успехи в получении больших токов, возникла идея о встречных электронных

¹В то время все работы оформлялись как закрытые отчеты. Их публикация стала возможной только через несколько лет.

пучках. В 1958 г., когда готовилось решение о создании Сибирского отделения Академии наук, Курчатов предложил Будкеру стать директором-организатором Института ядерной физики, используя его лабораторию как базу развития института до переезда в Новосибирск. Моя работа с Будкером на этом прервалась и возобновилась только в 1962 г. уже в Новосибирске.

А какова судьба «стабилизированного пучка»? Он остался несуществующим фантастическим проектом. Но на пути к его созданию было сделано много уникальных работ, ценность которых перекрывает исходную идею. Коллективом Будкера были впервые созданы встречные электронные пучки, встречные электрон-позитронные пучки, метод электронного охлаждения пучков тяжёлых частиц. Все эти достижения широко используются в лучных ускорителях мира и заведомо являются результатами нобелевского уровня. (Будкер, безусловно, получил бы премию, не уйдя он так рано из жизни).

Так революционное техническое предложение не только положило начало новой теоретической области, но и открыло новые направления в физике экспериментальной.

Поляризованные ядра

В середине 1950-х годов мне посчастливилось поработать с Е.К. Завойским. Человек мягкий, интеллигентный, но с твердым чувством собственного достоинства. Он старался выбирать оригинальные задачи (а не «работать строем» в крупных коллективах). Из большой «проблемы термояда» мы обсуждали возможную зависимость термоядерной реакции от спиновой поляризации и возможности ее экспериментальной проверки. Результат: работа об источниках поляризованных ядер для ускорителей [8].

Рождение квантовой теории поля

В своё время объяснение строения атомов и их спектров было триумфом квантовой механики. Однако для самого простого атома водорода долго сохранялась одна загадка. Его первый возбуждённый уровень включал два очень различных состояния. Одно из них, $2p$, обычное, короткоживущее, а другое, $2s$, живёт необычно долго (на

8 порядков дольше). Почему столь различные состояния имеют одинаковую энергию? Существуют ли в природе явления, выходящие за рамки квантовой механики, которые приводят к расщеплению этих состояний?

Ещё до войны разность энергий двух состояний пытались обнаружить, измеряя энергии переходов из верхних уровней в каждое из этих состояний. Определённого результата получить не удалось из-за больших экспериментальных ошибок. Наиболее убедительным экспериментом было бы наблюдение прямого перехода между состояниями $2p$ и $2s$ под действием резонансного радиоизлучения. Однако до войны генераторы радиоизлучения были слишком несовершенны. После войны, в 1947 г., произошёл прорыв как в экспериментальной, так и в теоретической области. Теоретики предположили, что если электромагнитное поле также подчиняется квантовым законам, то даже при отсутствии зарядов и токов, то есть в вакууме, должны существовать флуктуации электромагнитного поля, которые приведут к увеличению энергии состояния $2s$, другими словами, к расщеплению уровней. Колоссальный прогресс радиолокации за время войны, где использовалось радиоизлучение того же диапазона, дал возможность У. Лэмбу измерить расщепление уровней, которое совпало с теоретическим предсказанием. Так произошло открытие новой области физики, квантовой теории поля.

Началось бурное развитие теоретических методов — появились функции Грина, графики Фейнмана, уравнения Дайсона. Все это создавало очень эффективный и элегантный аппарат для исследований. Можно ли использовать эти методы в других областях?

А.Б. Мигдал и В.М. Галицкий выяснили, что возможны перспективы приложения этого аппарата в задачах многих частиц. Галицкий стал рассматривать случай неидеального ферми-газа, я же решил заняться бозе-газом.

Теория неидеального бозе-газа

При отсутствии взаимодействия (и нулевой температуре) все частицы бозе-газа находятся в состоянии с нулевым импульсом, образуя «бозе-конденсат». При включении взаимодействия (отталкивания) конденсат сохраняется, но часть частиц выталкивается вверх, в состояния с ненулевым импульсом. Вид взаимодействия определяет, сколько частиц вытолкнуто из конденсата и куда их забросило. Раньше эту задачу рассматривал Н.Н. Боголюбов, используя простую модель взаимодействия. Т.Д. Ли и С.Н. Янг предложили модель «твёрдых шаров». Новые методы квантовой теории поля давали воз-

можность использовать реальное взаимодействие между частицами. Задача оказалась нетривиальной. Графики Фейнмана и уравнения Дайсона потребовалось дополнить новыми структурами, что усложнило вычисления. Результаты я получил к концу 1956 г.

Квантовые системы многих частиц обычно характеризуют спектром их элементарных возбуждений, или квазичастиц. Основное состояние считается вакуумом относительно квазичастиц. Не очень высокие возбуждённые состояния можно рассматривать как разреженный газ, состоящий из квазичастиц. Спектр квазичастиц — зависимость их энергии от импульса, которая получилась у меня, началась с линейной функции, характерной для фононов, что обеспечивало свойство сверхтекучести, а затем изгибалась вверх. Причём фононы получались неустойчивыми и могли распадаться на два фонона меньших энергий. Результаты я изложил в двух статьях и летом 1957 г. отправил их в «Журнал экспериментальной и теоретической физики» (ЖЭТФ) [9, 10]. Из редакции ЖЭТФ я получил отписки статьи не только на русском, но и на английском. Тогда ЖЭТФ очень оперативно для того времени, с задержкой всего 5–6 месяцев, полностью переводился на английский язык. Меня удивило, что мои статьи переводил Ф. Дайсон, поскольку я не мог предположить, что физики столь высокого уровня занимаются переводами с русского — такое было внимание в то время к научным результатам из нашей страны!

Экспериментальное открытие конденсации Бозе–Эйнштейна в газе некоторых атомов произошло только через 40 лет. Это стало крупной научной сенсацией. Количество экспериментальных и особенно теоретических работ росло лавинообразно. В нескольких экспериментальных работах сообщалось об открытии предсказанного мною эффекта расщепления фононов (эффект получил название «затухание Беляева»):

- "Experimental observation of Beliaev Coupling in a Bose–Einstein Condensate". E. Hodby et al. PRL, 86, 219640;
- "Beliaev Damping of Quasiparticles in a Bose–Einstein Condensate". N. Katz et al. PRL, 89, 220401;
- "Beliaev Damping and Kelvin mode Spectroscopy of a Bose–Einstein Condensate". T. Mizushima et al. PRL, 90, 180401.

Теория сверхпроводимости

1957 г. — новая сенсация в теоретической физике: после 46 лет попыток была создана теория сверхпроводимости. История её создания очень поучительна.

Теория сверхтекучести появилась давно. Казалось бы, сверхпроводимость — это сверхтекучесть заряженной «электронной жидкости». Но электроны, в отличие от гелия, — это не бозе-, а ферми-частицы. Даже две ферми-частицы не могут находиться в одном и том же состоянии, поэтому из них невозможно образование конденсата. Правда, два электрона в связанном состоянии образуют бозе-частицу. Но как они могут связаться, если одинаково заряжены и отталкиваются? Правда, в металле заряды электронов компенсируются зарядами ионов, но для связи нужно притяжение. Вопрос оставался без ответа.

Затем в сверхпроводниках был обнаружен изотопический эффект, то есть зависимость температуры сверхпроводимости от атомной массы ядер кристаллической решётки. Как может кристаллическая решётка влиять на взаимодействие между электронами? Возможно, это происходит через волны, распространяющиеся по кристаллу (фононы): один электрон возбуждает волну, а другой эту волну ловит. После расчётов выяснилось, что такой «обмен фононами» действительно приводит к слабому притяжению между электронами, но согласно законам квантовой механики при слабом притяжении связанное состояние возможно в одномерном и двумерном пространстве, а в трёхмерном — невозможно.

Ключевая идея была предложена молодым американским физиком Л. Купером в краткой статье, опубликованной в конце 1956 г. Его идею можно понять на простой электронной модели металла. Представим, что весь положительный заряд кристаллической решётки равномерно «размазан» по объёму металла («модель желе») и полностью компенсирует заряды электронов. В каждом элементе объёма такого металла электроны (как ферми-частицы) должны иметь разные по величине и (или) направлению импульсы, начиная с самой малой до некоторой граничной величины. Последний занятый уровень называют границей (или поверхностью) Ферми, а всю заполненную область — зоной Ферми. Ее можно представить себе в виде сферы, где радиус определяет энергию или величину импульса, а разные точки по поверхности сферы соответствуют разным направлениям импульса. Изменить своё состояние без большой затраты энергии электроны могут лишь вблизи ферми-границы, немного повысив энергию и двигаясь вокруг сферы. Но это означает, что электроны вблизи ферми-поверхности находятся не в трёхмерном, а двумерном пространстве и поэтому могут образовать связанное состояние даже при слабом притяжении. Такие пары связанных электронов получили название «куперовских пар». Из них состоит вся ферми-поверхность электронов в сверхпроводнике. Для того чтобы возбудить это низшее состояние металла, надо разорвать куперовскую пару, то есть затратить конечную энергию. Поэтому не слишком сильный ток будет протекать без потери энергий, что и является сверхпроводимостью.

«Эффект Купера» явился последней подсказкой. Через полгода вышла работа Дж. Бардина, Л. Купера и Дж. Шриффера (БКШ). С точки зрения математики теория БКШ не была идеальна. Н.Н. Бо-

голюбов предложил более общий метод канонических преобразований. Я стал обдумывать, как это можно использовать для решения других проблем. На конкретную задачу меня натолкнули внешние обстоятельства.

Куперовское спаривание в ядерной физике

В начале осени 1957 г. И.В. Курчатов вызвал к себе домой меня и молодого сотрудника сектора Мигдала В.М. Струтинского и сообщил, что мы командированы на годичную стажировку в Данию, в Институт Н. Бора. Пояснил, что с этим институтом до войны были очень хорошие контакты и теперь пришло время их возобновить. Так в сентябре 1957 г. началась моя работа в Копенгагене.

Институт Н. Бора имел немного постоянных сотрудников, в основном там работали стажёры из институтов всего мира. Некоторые приезжали на один-два года, другие — на пару месяцев или недель. Кроме того, каждую неделю случались визиты известных учёных, проходили их лекции или семинары. Известные физики, приезжавшие из США в Европу, как правило, считали своим долгом посетить институт и встретиться с Нильсом Бором. Со многими стажёрами и лекторами я поддерживал потом связь в течение многих лет.

Основной тематикой института была ядерная физика.

Послевоенная ядерная гонка сопровождалась и созданием инфраструктуры для «мирных» исследований в ядерной физике — исследовательских реакторов, ускорителей, новых видов детекторов. Всё чаще появлялись публикации данных о строении ядер, спектрах их излучения. Актуальной темой стала теория атомного ядра.

Для теоретической физики ядро — сложный объект. Это система из многих сильно взаимодействующих частиц. Конечно, физика твёрдого тела, которая изучает металлы и полупроводники, имеет дело с ещё большим числом частиц. Но там известны как структура объекта, так и взаимодействие (электромагнитное) между частицами. В теории ядра приходится довольствоваться моделями, проверяя их точность при сравнении с экспериментом.

Именно в Копенгагене была оформлена оболочечная модель, в которой описывались основные состояния ядер и их одночастичные возбуждения, а теперь группой О. Бора и Б. Моттельсона создавалась «обобщённая модель», в которой рассматривались общие свойства «коллективных возбуждений» — колебаний и вращений ядер. Однако для сравнения с экспериментом для каждого ядра требовалась подгонка числовых параметров.

Микроскопическая теория, согласно которой ядерные параметры вычисляются исходя из динамики нуклонов в ядре, была в зачаточном состоянии. Так, хорошо определяемые из эксперимента вращательный момент инерции или аналогичный параметр для колебаний пытались вычислять с различными модельными силами между нуклонами. Результаты были странными.

Представим себе сферическую оболочку. Если её заполнить идеальной жидкостью, то при вращении жидкость останется в покое. Если оболочка деформирована, то вращаться будет только жидкость в деформированной части. При заполнении такой оболочки твёрдым веществом оно всё будет вращаться. Эти два примера определяют границы значений момента инерции при заданной деформации: от минимального значения для идеальной жидкости (гидродинамического) до максимального для твёрдого тела. Модель невзаимодействующих нуклонов, естественно, даёт гидродинамический момент инерции. Но учёт любого взаимодействия между нуклонами давал твердотельное значение. Экспериментальные значения варьируются, но они всегда существенно меньше твердотельного значения. Вычисления инерционного параметра для колебаний, наоборот, приводили к слишком малому гидродинамическому значению.

Теория сверхпроводимости также всколыхнула научные круги Копенгагена. Обсуждался свежий препринт О. Бора, Б. Моттельсона и Д. Пайнса с гипотезой о том, что наблюдаемая энергетическая щель в спектрах сферических ядер может быть связана с образованием куперовских пар нуклонов.

Я сформулировал для себя более общую задачу: исследовать возможность и все следствия куперовского спаривания нуклонов в ядрах. Какое-то время занял анализ экспериментальных данных, выбор моделей и методов расчёта. Примерно через полгода картина стала ясна. Удалось, используя метод канонических преобразований Боголюбова и упрощённые, но разумные динамические модели ядер, рассмотреть широкий круг вопросов: форму ядер и её изменения, одночастичные и коллективные возбуждения и их параметры. Я нашёл объяснения как парадоксов с инерционными параметрами, так и несколько других. Например, такого: стабильность сферической формы ядер вблизи замкнутых оболочек (деформация возрастает не постепенно с каждым новым нуклоном в верхней оболочке, а резко, когда их накапливается определенное количество). Показал, что существуют низкоэнергетические колебательные состояния (с энергией меньше куперовского спаривания) в сферических ядрах вблизи порога их стабильности.

Решение очевидной и долго обсуждаемой проблемы момента инерции я доложил [11] на конференции по ядерной физике в Париже летом 1958 г., куда был командирован Институтом Н. Бора. Все результаты были опубликованы уже после моего отъезда в отдельном выпуске «Трудов датской королевской академии» [12].

В конце 1958 г. я вернулся в Курчатовский институт, где продолжил работу, начатую в Копенгагене. В статьях [17, 18] результаты,

полученные в копенгагенской работе, обобщаются с использованием методов квантовой теории поля: графиков и функций Грина. Находятся и анализируются новые типы коллективных возбуждений ядер. В январе 1962 г. я защитил докторскую диссертацию на тему «Эффекты парной корреляции нуклонов в атомных ядрах».

Техника эксперимента в ядерной физике непрерывно развивается, выдавая новые и более точные данные о широком круге ядер. Теоретическое объяснение результатов пока отстаёт. Так что стимулов для развития теоретической ядерной физики сегодня достаточно.

Коллективные ядерные возбуждения

Работа [20] открывает период многолетнего сотрудничества с Володей Зелевинским, многогранно талантливым и очень привлекательным человеком.

Когда я уже собирался к отъезду в Новосибирск (подробнее об этом — в воспоминаниях о Г.И. Будкере, с. 154), мне позвонили с вопросом, не нужен ли мне аспирант. «Талантливый мальчик ждет распределения после окончания физфака МГУ, не хотелось бы, чтобы он «загрелся» куда-либо по распределению».

Мы встретились прямо у проходной Курчатовского института. Мне он очень понравился. Одно лишь меня смутило: он оказался кандидатом в мастера по шахматам. Но он заверил меня, что увлекаться этим не будет. Мое решение было: готов взять в аспирантуру, но уезжаю в Новосибирск. Если он готов также туда поехать (а условия переезда были очень благоприятные), то будем работать. Он ответил, что склонен согласиться, но должен поговорить с женой (его сокурсницей). Через пару месяцев мы встретились в Институте ядерной физики Будкера, и я оформил его как научного сотрудника в мою лабораторию теоретической физики.

Наше многолетнее сотрудничество было очень эффективным несмотря на мое вынужденное отвлечение (с 1964 г.) на заботы об университете. Основная тематика работ с В.Г. Зелевинским — теория коллективных возбуждений в ядрах. Область обширная и сложная. Средние и тяжелые ядра разнообразны как по форме (сферические, деформированные), так и по характеру возбуждений (колебания, вращения и т.д.). Наши работы в этой области широко цитировались, докладывались и обсуждались на многих научных конференциях.

В 2004 г. мне была присуждена медаль Финберга (Feenberg). Эта медаль присуждается раз в три года за работы по квантовой теории многих тел. Вручение происходит на Международной конференции

"Quantum many-body Physics", где лауреату также предлагается выступить с докладом. Работа [112] — это мой доклад на этой конференции².

Ультрахолодные нейтроны

Нейтрон — один из двух нуклонов, образующих ядра всех атомов — в свободном виде неустойчив и имеет время жизни около 15 мин. Нейтроны освобождаются из ядер при делении в ядерных реакторах, поддерживая их работу. Нейтронные пучки, генерируемые в исследовательских реакторах, через специальные каналы (трубопроводы) доступны для физических экспериментов. Среди этих нейтронов есть небольшое число очень медленных ультрахолодных нейтронов (УХН) с очень необычными свойствами. Они, как от зеркала, отражаются почти от любых поверхностей, поэтому их можно хранить в замкнутых объёмах, которые Я.Б. Зельдович, предсказавший такой эффект в 1959 г., назвал «нейтронными бутылками». Первое экспериментальное подтверждение его предсказания было сделано в 1968 г. научной группой Ф.Л. Шапиро, которой удалось хранить УХН в течение 30 с. С тех пор в технике экспериментов с УХН произошёл огромный прогресс.

Именно с УХН получены самые точные данные о свойствах нейтрона. Схема типичного эксперимента кажется простой. В замкнутую камеру запускаются УХН строго фиксированной энергии, которая просто связана с высотой подъёма УХН в гравитационном поле Земли. Все процессы с нейтронами — их распад, ядерный захват в материале сосуда, нагрев до «тепловой» энергии — можно контролировать. Через определённое время оставшиеся нейтроны по одному выпускаются из сосуда с измерением их энергии.

В конце 1990-х годов стали появляться работы, в которых было отмечено размывание энергии оставшихся в сосуде нейтронов — «малое нагревание» и даже «малое охлаждение». Впервые это заметила курчатовская экспериментальная группа В.И. Морозова — одна из лучших, работающих с УХН. Результат кажется парадоксальным. «Малое охлаждение» означает, что энергия от УХН, то есть очень холодного тела, передаётся сосуду с более высокой температурой. Редакция «Писем в ЖЭТФ» дважды отклонила статью

²Кроме медали Финберга мне были присуждены Академией Наук Золотая медаль им. Л.Д. Ландау (1998 г.), Большая Золотая медаль им. М.В. Ломоносова (2010 г.). При ее вручении лауреату предлагается выступить с докладом на общем собрании РАН, текст которого публикуется в Вестнике Российской Академии Наук. Некоторые фрагменты из моего доклада [114] использованы в этой публикации.

об этом эксперименте как противоречащую второму закону термодинамики. Она была напечатана только после моего разъяснения, что УХН не находятся в тепловом равновесии с сосудом.

После обсуждения этих экспериментов я начал искать возможности их теоретического объяснения. Просмотрев несколько монографий по взаимодействию нейтронов с разными средами (кристаллическими, аморфными, жидкими), я убедился, что для УХН все известные методы неприменимы. Необходимо всё создавать самому.

Ультрахолодные нейтроны являются сугубо квантовыми объектами, имея очень малый импульс и, следовательно, большую длину волны, другими словами, они размазаны по пространству. Когда такое УХН-облако попадает внутрь сосуда, оно одновременно когерентно возбуждает большое число ядер, которые затем когерентно излучают новое УХН-облако в противоположном зеркальном направлении. Такая картина отвечает упругому рассеянию. При неупругом рассеянии после вылета нейтрона конечное состояние материала сосуда меняется. Учёт всех возможных изменений оказался очень сложным с математической точки зрения. Вместе с А.Л. Барабановым нам удалось разобраться с проблемой и сформулировать теорию рассеяния для всего спектра медленных нейтронов, от тепловых до ультрахолодных [90, 111]. Численные результаты для конкретных экспериментов объяснили только часть эффекта. Возможно, это связано с рассмотрением идеальных поверхностей сосуда. Не исключено, что УХН-облако размером порядка 10 нм может «чувствовать» неоднородности того же размера. Если это подтвердится, то УХН могут стать уникальным методом диагностики идеальности поверхностей.

Эффект Соколова

Работа [106] относится к объяснению уникальных экспериментов Ю.Л. Соколова, блестящего экспериментатора и многогранно талантливого человека. Его очень ценил Курчатов, привлекая его к решению наиболее сложных проблем, а в основном отпуская в «свободное плавание».

Юрий Лукич предпочитал все делать своими руками. Приведу только два примера. Из вывезенного из побежденной Германии «технического хлама» он собирал уникальные фотоаппараты. А во время ежегодного отпуска на Тянь-Шане наблюдал различия в выращивании овощей в условиях более мощного ультрафиолета.

Его последние эксперименты связаны с интерференцией $2s$ - и $2p$ -состояний атома водорода. Для ее наблюдения требуется миниатюрная аппаратура микронной точности. Юрий Лукич сделал ее сам.

Б.Б. Кадомцев, в подразделении которого работал Ю.Л. Соколов, назвал его поразительные результаты «эффектом Соколова» и предложил его объяснение довольно мистической «е-е корреляцией ЭПР» (Эйнштейна — Подольского — Розена).

После кончины Б.Б. Кадомцева Ю.Л. Соколов стал обсуждать свои результаты со мной. Постепенно складывалась физическая картина его результатов. Я предложил некоторые модифицированные эксперименты, в которых ожидания начали подтверждаться. Болезнь и внезапная кончина Юрия Лукича прервали наши контакты.

Ю.Л. Соколов делал свои эксперименты в сложных условиях. Вся дифракционная кривая имеет миллиметровые размеры, и для ее получения необходимо измерять положения точек с микронной точностью. Каждая точка отмерялась через микроскоп, положение которого также требовало фиксации. Юрий Лукич только мечтал об автоматических пошаговых фиксаторах, которые тогда только появились.

Смерть Ю.Л. Соколова прервала исследования на самом интересном месте. Продолжение и развитие этих работ имеет фундаментальное значение. Во времена Юрия Лукича в мире не нашлось ни одной лаборатории, которая смогла бы повторить его эксперименты. Но техника измерений быстро развивается, и есть надежда, что продвинутые экспериментальные группы продолжат эти исследования. (Я лично продолжаю агитировать новосибирский ИЯФ.)

Не теорфизикой единой ...

Но подобные «минуты роковые», о которых шла речь выше, в науке происходят не часто. Значительно чаще случаются события и возникают обязанности, может быть, важные, но не позволяющие быть полностью погруженным в теоретическую физику. Вот несколько примеров моих «вынужденных отвлечений».

Лето 1962 г., Новосибирский академгородок. Я — заведующий теоретическим отделом Института ядерной физики. Более двух лет интенсивной работы. А затем пришлось стать ректором Новосибирского университета — после моего долгого сопротивления. Первого ректора НГУ академика И.Н. Векуа пригласили возглавить Академию наук Грузии. Бывшего ректора Ленинградского университета А.Д. Александрова не утвердил Новосибирский обком. Уже два года НГУ без ректора.

Меня уламывают М.А. Лаврентьев, Г.И. Будкер, В.В. Воеводский (организатор и декан факультета естественных наук, объединяющего химию и биологию). Своеобразный аргумент привел А.Д. Александров: «Вы имеете большое преимущество: это будет Ваша первая

административная должность. Никакой предшествовавший опыт не будет мешать.» Возможности отказа уже не было.

Важность университета в научном центре была очевидна. Небольшой первоначальный десант научных групп давал лишь центры конденсации для образования коллективов институтов. Рассчитывать на массовый приезд квалифицированных специалистов не приходилось, поэтому кадры исследователей необходимо было готовить на месте. Университет в научном центре создаёт идеальные условия для развития «системы физтеха». Очевидное слабое место — уровень абитуриентов. Поэтому пришлось потратить много усилий на организацию системы поиска талантливых ребят по всей Сибири и Дальнему Востоку через олимпиады, летние школы, отбор лучших в школу-интернат при университете, выявление лучших школ и учителей и контакты с ними. В результате мы получили большой конкурс и хороший приём в Университет (на месяц раньше приёма в другие вузы, чтобы дать возможность поступления в них не прошедшим конкурс в НГУ).

За годы работы ректором удалось (при полной поддержке М.А. Лаврентьева, директоров и ведущих сотрудников институтов) вписать НГУ в систему научного центра. У студентов с третьего курса (а для желающих раньше) начиналась исследовательская практика в институтах. Деканы, заведующие кафедрами, преподаватели (кроме иностранного языка, военного дела и физкультуры) — сотрудники институтов и одновременно совместители в НГУ. Защиты дипломов — смотр уровня научных исследований институтов и их лабораторий. Основное распределение — в институты центра.

Конечно, такая система значительно отличала НГУ от других вузов страны. Но и в то время (как, впрочем, и сейчас) находились желающие навести единый порядок во всех вузах. В начале 1970-х годов вышло постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР, в котором запрещалось совместительство в вузах, а также приёмные экзамены в июле (кроме МГУ). Я пришёл к Лаврентьеву и сказал, что это постановление для НГУ означает катастрофу и исполнять его я не буду. Он согласился и рекомендовал написать письмо секретарю ЦК КПСС П.Н. Демичеву. Для гарантии, не полагаясь на «спецпочту», я сам отвёз письмо в Москву и сдал в ЦК под расписку. Когда через два месяца ответа всё ещё не было, я попросил Лаврентьева позвонить в ЦК. Через неделю он передал результат разговора: «Менять постановление не будем, но министерству образования рекомендовали не обращать на вас внимания».

Замечу, что при этом я, наоборот, был совместителем в Институте ядерной физики. Старался проводить там полдня. Работа шла, и вышло немало моих статей по ядерной физике.

Но 13 лет ректорства — это было уже слишком много. Со временем всё больше чувствовалась необходимость перемен. Тем более что в 1975 г. уехал Лаврентьев, в 1977 г. не стало Будкера, Анатолий Петрович Александров неоднократно предлагал вернуться в Курчатовский институт. Главное, что меня задерживало — кому передать

ректорство. Лучшего выбора, чем В.А. Коптюг, я не видел: отличный заведующий кафедрой, он не входил в руководство Института органической химии, в котором работал. Будущее показало, что этот выбор был более чем удачен. Коптюг стал очень хорошим ректором, хотя и ненадолго — уже через два года он был избран председателем Президиума Сибирского отделения и оставался им в течение 17 лет (до своей кончины) в самое трудное для науки время.

В Курчатовском институте

А я после 16-летнего перерыва снова в Курчатовском институте: с 1978 г. — заведующий теоретическим отделом, с 1981 г. по 2006 г. — директор сначала Отделения, а потом Института общей и ядерной физики (ИОЯФ), где сосредоточены почти все фундаментальные исследования. Хотя времени на теоретические работы оставалось все меньше, вышло несколько совместных публикаций с сотрудниками бывшего теоретического сектора Мигдала. Особенно плодотворное сотрудничество сложилось с И.М. Павличенковым, удивительно талантливым и оригинально мыслящим теоретиком (вместе мы написали работы [50, 53]).

Внутренние заботы директора ИОЯФ были многообразны, что можно усмотреть из некоторых публикаций. Совместные работы с другими (в основном иностранными) институтами, участие в международных проектах. Впервые удалось организовать успешное взаимодействие с ЦЕРНом (которое продолжается до сих пор).

В ноябре 1989 г. наша экспериментальная группа В.И. Манько получила предложение из ЦЕРНа войти в коллаборацию, работающую на ускорителе тяжёлых ионов SPS, но для этого было нужно изготовить 3 тыс. детекторов из свинцового стекла с электроникой. Времени в обрез, так как сеанс на пучках назначен на 1 сентября следующего года. Заключение экспертов ЦЕРНа было однозначно: к сентябрю успеть нельзя.

Мы решили рискнуть, хотя понимали, что срыв ставил крест на нашем участии. 8 января 1990 г. стёкла были в ЦЕРНе, и наша команда приступила к монтажу. В итоге эксперимент в сентябре прошёл успешно, а к концу года число детекторов возросло до 10 тыс. с общей площадью детектирующей системы 16 м². Так началось наше сотрудничество с ЦЕРНом в проекте WA98 на ускорителе тяжёлых ионов SPS. После окончания проекта в связи с демонтажом ускорителя SPS наш детектор был отправлен в Брукхейвен и установлен на накопителе тяжёлых ионов. В ЦЕРНе наша группа играет ведущую роль в экспериментах на Большом адронном коллайдере в детекторе ALICE.

Курчатовский источник синхротронного излучения

Более подробно хочу рассказать об истории создания в Курчатовском институте синхротрона.

Интерес к использованию излучения из циклических электронных ускорителей возник в начале 1970-х годов. Вскоре началось строительство специализированных источников СИ.

В нашей стране первый выведенный из ускорителя пучок СИ был получен в Новосибирском ИЯФ в 1973 г. Одним из первых пользователей этого пучка была А.А. Вазина, биофизик из Пуцзино. Когда в 1975 г. А.П. Александров стал Президентом Академии наук, он предложил биофизику академику Г.М. Франку подумать о строительстве синхротрона в Пуцзино. Время шло, но решения все не было.

В 1977 г. АП (так в КИ все называли — за глаза и в глаза — Анатолия Петровича) в разговоре со мной сказал: Франк и его команда ничего не могут сделать. Будем строить синхротрон у нас. Просил связаться с Новосибирском.

В 1978 г. между КИ и ИЯФ был заключен договор о создании комплекса СИ:

- 1-й этап: линейный ускоритель-инжектор «Факел» и накопитель «Сибирь-1» с энергией 450 МэВ;
- 2-й этап: накопитель «Сибирь-2» с энергией 2,5 ГэВ (инжекция из «Сибири-1»). (Такой комплекс уже 7 лет успешно работал в ИЯФ.)

Для размещения всего комплекса СИ необходимо было строительство большого корпуса, поэтому, когда новосибирцы поставили нам «Сибирь-1», мы предварительно разместили ее в подвальном этаже ускорителя «Факел» и ее запуск продемонстрировали АП. Окончательный запуск всего комплекса в новом корпусе прошел уже после кончины АП (1986 г.).

«Сибирь-1» была запущена летом 1994 г., а «Сибирь-2» — в апреле 1995 г. Но оптимизация работы всех узлов, подбор параметров для устойчивого накопления тока и времени жизни пучка, монтаж рабочих станций на выведенных пучках — все это требовало времени. Поэтому надежная работа на пучках большого кольца началась в начале 1999 г., а официальное открытие Курчатовского Источника СИ (КИСИ) состоялось 1 октября 1999 г. (см. работы [76, 91]).

Это было очень трудное время. Резко упало финансирование, стали уходить сотрудники. Проблематична стала вообще работа КИСИ.

В это время мне стал доступен выпущенный в США отчет специальной комиссии DOE по проверке эффективности работы трех

новых синхротронов, где отмечался ряд тем, полезных для направлений работ DOE (аналога нашего Минатома). Надежда была только на помощь Минатома.

На мою просьбу министр Е.О. Адамов сказал: «У меня нет никаких возможностей для благотворительности, я не знаю, как поддерживать свои теоретические институты». Мой ответ был, что я пришел не за благотворительностью, а с предложением работ по основной тематике Минатома. И стал их перечислять (например, анализ старения материалов ядерного вооружения). Он внимательно слушал, а затем изложил свое решение: «Создадим совместную комиссию с двумя сопредседателями, одним будешь ты, другой — от Министерства. Задание: выработать конкретную программу работ, согласовав с нашими организациями. Срок — один год. А пока я буду обеспечивать определенную поддержку для работы синхротрона. А сейчас свяжись со Львом Дмитриевичем (Рябевым, тогда 1-м замом министра) и поговори с ним подробно».

Комплекс СИ получил возможность для работы, но для его ведущих сотрудников, особенно директора КИСИ В.Г. Станкевича, год был насыщенный и сложный. Связь с сотрудниками предприятий Минатома, ознакомление их с возможностями СИ и определение их потребностей. Затем проектирование установок для работы на пучках. Составлялись соглашения по совместным работам. Наши предложения по использованию СИ для решения прикладных работ Минатома, согласованные с ВНИИЭФ, в марте 2000 г. я направил Л.Д. Рябеву.

Большая работа проводилась с подразделениями Курчатовского института, занимающимися реакторным материаловедением. На одном из каналов СИ у нас активно работали сотрудники Института кристаллографии РАН, директором которого был М.В. Ковальчук. Работу групп М.В. Ковальчука и нашего Отделения СИ ИОЯФ (около 100 сотрудников) Е.П. Велихов (директор Курчатовского института) решил координировать лично. В 1999 году он пригласил М.В. Ковальчука на работу в институт возглавить созданную «группу синхротронных исследований», которая затем стала Курчатовским институтом синхротронных исследований.

На этом этапе я решил, что свою работу я выполнил: синхротрон запущен на проектные параметры. А дальнейшая организация работы физиков, химиков и биологов на пучках СИ может продолжаться без меня, о чем я и сказал Е.П. Велихову.

Вспоминая Чернобыль

26 апреля 1986 г. ЧЕРНОБЫЛЬ. В Курчатовском институте ежедневно собирается оперативный штаб под председательством В.А. Легасова, установили постоянную связь с курчатовской группой в Чернобыле. В нашем ИОЯФ специалистов-реакторщиков нет, но мы пытаемся помочь, как можем.

Так, в первые дни после аварии возникли сложности с разведкой радиационного загрязнения вокруг четвертого блока: большая площадь, высокая активность даже для замеров из бронемашин. Предложения о помощи поступают отовсюду, например, залить всю площадку сцинтиллятором и определять активность по интенсивности свечения. Выяснилось, что необходимого количества сцинтиллятора нет и его невозможно произвести в ближайшее время. Мне приходит в голову, что азот воздуха ведь тоже сцинтиллирует, правда, в ультрафиолете. За пару дней изготовили систему для фотографирования в ультрафиолете, но для исключения солнечных помех снимки пришлось делать ночью. В результате мы смогли получить карту с пятнами максимальной активности. Были от нас и другие предложения. В результате меня ввели в оперативный штаб с задачей научной экспертизы поступающих предложений, а в июле 1986 г. я уже изучал обстановку на месте, непосредственно в Чернобыле.

Так на много лет я оказался связанным с чернобыльскими проблемами. После сооружения укрытия над четвертым блоком (конец 1986 г.) в Чернобыле была организована Постоянная чернобыльская экспедиция Курчатовского института и я был назначен её научным руководителем. Месяц-полтора в году я проводил в Чернобыле.

Главные работы велись внутри аварийного четвертого блока: разведка помещений и съёмка их радиационных загрязнений, анализы разлившейся и застывшей лавы, поиск подходов к шахте реактора и их дезактивация, прокладка электрических и коммуникационных кабелей. Организовали бурение внутрь шахты реактора и других недоступных помещений с возможностью замера радиации, температуры, фото- и киносъёмки через пробуренные каналы. Всего было пробурено свыше 130 скважин, через которые зафиксировали состояние полностью разрушенного реактора.

Одновременно в Академии наук я стал заместителем А.П. Александрова в комиссии по научным проблемам Чернобыля, а после его отставки возглавил комиссию. Меня ждали поездки по загрязнённым районам Украины и Белоруссии, представительство в международном Чернобыльском проекте... Даже перечисление всего займет слишком много времени.

Начало 1992 года. На первом заседании Правительства независимой Украины принято постановление: работы иностранных организаций в Чернобыле прекратить, все их сотрудники должны в течение

месяца покинуть Украину, передав всё оборудование, материалы и документы проведённых работ представителям правительства Украины. Так закончилась работа Курчатовской чернобыльской экспедиции. Мы оставили хорошо оборудованный лабораторный корпус, большую библиотеку отчётов, коллекцию образцов материалов из укрытия. Если честно, вывезли все же копии всех отчетов и образцов. (Как оказалось, не зря: через какое-то время в Чернобыле уже ничего не осталось.)

Но из чернобыльских проблем я вышел только через три года после этого, когда кончился Четырёхсторонний международный проект по последствиям Чернобыля (Европейская Комиссия — Беларусь — Российская Федерация — Украина), где я постоянно оставался научным представителем от России, несмотря на частую смену представителя правительства (который менялся вместе с самим правительством).

Некоторые мои чернобыльские заметки и выступления приводятся ниже. Они относятся к разным этапам ликвидации последствий аварии; в них обсуждаются:

- Оценка выбросов из разрушенного реактора;
- Беспрецедентный медицинский Международный чернобыльский проект;
- Стратегия ликвидации последствий аварии в Чернобыле.

Последней проблеме были посвящены несколько международных конференций: в США (1998 г.) и в Европе (2000 г.), где я выступал с докладами. (К сожалению, в нашей стране таких конференций не было, поэтому приводится английский текст.)

Что можно сказать в заключение? Я всегда ощущал себя прежде всего физиком-теоретиком, но не считал возможным отгородиться от всего остального в жизни и потому соглашался на «вынужденные отвлечения». Но свое время и приоритеты я всегда распределял сам и никогда не занимался тем, чего я не приемлю. А как наше дело отзовется, нам не дано предугадать.

Проблемы Чернобыля

Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы

Беседа председателя Межведомственного координационного совета при АН СССР по проблемам, связанным с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС, академика С.Т. Беляева с корреспондентом журнала «Природа» Г.М. Львовским. — Природа, 1990, вып. 11.

— *Спартак Тимофеевич, как известно, сразу же после аварии в Чернобыль прибыли не только руководители высокого ранга и военные, но и ученые. Какова была роль науки в проведении работ на разрушенном блоке, какую долю ответственности она несет за решения (правильные или не вполне), принятые там после 26 апреля?*

— Не согласен с самой постановкой вопроса.

Во-первых, надо отделить науку от принятия решений. Истинная наука производит знания, устанавливает факты и отвечает только за их достоверность, но никогда никаких решений не принимает. И лишь в силу социального невежества нашего общества на науку и ученых вешают все огрехи. Но в чрезвычайной ситуации Чернобыля трудно отделить науку от принятия решений — многие действия там одновременно преследовали и научно-технические, и политические цели.

Во-вторых, следует избегать еще одной путаницы: есть наука, а есть люди в науке. Люди в науке имеют свои интересы — научные и политические, групповые и личные — и могут по-разному использовать те данные, достоверные или не очень, которыми располагают. Поэтому нужно различать, что есть наука, а что делается людьми науки.

К примеру, сейчас очень сложное положение с научной или даже околонучной информацией о Чернобыле — реальные данные тонут в море домыслов, искаженных слухов. Конечно, то, что эту информацию так долго закрывали, — беда номер один. Но надо понимать, что хотя ее и скрывали от населения, ее никогда не скрывали от людей, которым она была нужна для принятия решений, от специалистов, которые могли дать независимые оценки, предложить альтернативные варианты. С первых дней после аварии под руководством В.А. Легасова в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова ежедневно собиралась рабочая группа — своего рода мозговой центр, где проводился анализ ситуации и поиск возможных решений. И какая бы проблема перед нами ни возникала, мы всегда старались привлечь к ее решению как можно более широкий круг специалистов, рассматривали все методы, которые предлагались, приветствовали любые обращения к нам. Мы никого не отталкивали, никогда не говорили «не надо». Давали возможность поехать в Чернобыль, присмотреться на месте, попробовать. У кого-то получалось, у кого-то

нет. Фактически там сейчас остались работать те, чьи предложения оказались лучше, кто выиграл это неявное соревнование.

— *Но из-за того, что эти проблемы обсуждали только специалисты, остальные узнавали о ходе работ главным образом из отрывочных и не всегда объективных сообщений газет и телевидения. Не могли бы вы подробнее рассказать об этих работах?*

— С самого начала возникло множество вопросов. Первый: не продолжается ли в разрушенном реакторе цепная реакция? Быстро стало очевидным, что она прекратилась — по отсутствию в спектрах воздушных радиоактивных выбросов γ -линий короткоживущих изотопов, постоянно рождающихся при цепной реакции. Надо сказать, что, несмотря на очевидность такого вывода для специалистов, этот вопрос затем неоднократно задавали вновь.

Второй вопрос: где топливо и сколько его выброшено? Надо представлять обстановку — разрушенный блок, раскрытый реактор, все завалено обломками, остатки графита и топливных элементов на крышах. Высокие радиационные поля — даже на высоте 50–100 м в вертолете над развалом можно находиться считанные минуты. Возникли самые разные спекуляции на тему о том, сколько топлива выброшено — говорили, что половина или больше. А тут еще весьма уважаемая организация после замеров следов плутония в почве оценила выброс в 30 % (потом все объяснилось грубыми ошибками при радиохимическом анализе). Для ведения работ на площадке станции необходимо было установить нахождение хотя бы самых крупных масс топлива — концентрированных источников радиации. Измерение γ -полей обычными дозиметрами дает лишь усредненную картину.

Напомню, что пробег γ -квантов в воздухе составляет сотни метров, так что поля разных источников, расположенных на меньших расстояниях, сильно перекрываются. Обнаружить такие источники можно лишь при детальной съемке поля, что в трудных условиях Чернобыля было нереально. Грубые же измерения полей часто приводили к ложным обнаружениям топливных масс. Так, в первые недели считали, что чуть ли не основная масса топлива попала в машинный (генераторный) зал. Для «топографической» съемки были быстро сконструированы и изготовлены детекторы со свинцовыми коллиматорами. Установленные на вертолетных подвесках, они дали возможность получить карту радиоактивных источников на площадке станции, крышах зданий с разрешением порядка 10 м². Выяснилось, в частности, что топлива в машинном зале практически нет — в основном оно находится в здании реактора.

Узнать полный объем топлива в помещениях блока, измеряя γ -поля, невозможно из-за неопределенности, вносимой поглощением γ -квантов в самих топливных массах и завалах строительных конструкций. Возникла идея оценить количество топлива по выделяемому им теплу. (Все топливо реактора выделяло около 1 МВт.) Но как измерить это тепло? Пробовали разные методы. Сначала — самые простые. С вертолетов создавалась плоская дымовая завеса, а мы, наблюдая за поднимающимися вверх волнами, обнаруживали

топливо по конвективным воздушным потокам. Замеряя температуру и скорость потоков, можно было грубо рассчитать количество топлива. Затем пробовали в разных местах установить дозиметры, температурные датчики и другие приборы. Пытались опускать их на тросе с вертолета, но они разбивались или быстро выходили из строя, поскольку попадали на совершенно неизвестную поверхность, в неконтролируемые условия. А усилия на установку приборов тратились большие. Напомню только операцию «Игла» — установку металлического стержня с гирляндой датчиков в саму воронку развала, что потребовало отменного мастерства и мужества от вертолетчиков. Явно требовалась надежная и комплексная система диагностики развала реактора. Так возник проект «Буй»: комплекс приборов помещался в особый жесткий корпус пирамидальной формы, защищающий от внешних механических воздействий. С помощью вертолетов удалось в разных местах развала установить свыше десятка «буйев», кабели от которых были выведены на специально оборудованный стенд. Эта система надежно проработала вплоть до сооружения Саркофага, когда ее заменила другая, более совершенная. Но изготовлению «буйев» предшествовали долгие обсуждения, «мозговые штурмы». Каких только предложений не было — и использовать надувные шары с приборами, и перебросить над развалом тросы, по которым двигались бы специальные тележки с аппаратурой. Для определения химического состава выбросов пытались применять лазерное зондирование. Все варианты трудно даже вспомнить.

Одним из самых важных был вопрос о выбросах радиоактивности. Активная стадия аварии и основные выбросы прекратились через 10 дней после взрыва. Однако периодически возникали подозрения, что выбросы продолжаются и идет сильный перенос радиоактивности. Расскажу лишь об одном таком «ЧП». Самолет военных химиков, поднимаясь по спирали над разрушенным блоком до высоты 1,5 км, измерял активность в воздушном столбе над реактором. Военные считали, что этот столб смещается в сторону со скоростью ветра, перемножали его объем на концентрацию активности и скорость, переноса и получали огромную величину выброса. Мы же видели, что выбросы гораздо меньше. Спрашиваем: а почему на площадке АЭС активность не растет? Нам отвечают: перенос идет в верхних слоях воздуха, а внизу незаметен. Как понять, кто прав? Мы сделали простой расчет — прикинули, с какой скоростью поток радионуклидов из блока должен идти вверх, чтобы он успевал наполнить столб высотой 1,5 км за то время, пока ветер пронесет его мимо развала. Эта скорость оказалась втрое больше скорости звука, что невозможно. В действительности радиоактивный столб воздуха («шлейф») не сносился, а постоянно стоял над реактором. Правда, вдоль «шлейфа» медленный перенос активности шел.

Вывод о практическом отсутствии дальнейшего загрязнения мы проверили и по-другому. Для работы в районе Чернобыля был привлечен вертолет геологов с канадской детектирующей системой «Макфар». Обычно он используется для аэрогеологической развед-

ки. На его борту стоит ЭВМ, которая одновременно проводит геодезическую и у съемку, выдавая карту загрязнений. Автопилот ведет вертолет параллельными галсами, так что за рабочий день можно снять карту в квадрате 15 × 15 км. Мы выбрали 6 квадратов с разных сторон от ЧАЭС и поочередно проводили в них съемки, так что через 6 дней вертолет возвращался к прежнему квадрату. Повторили цикл 3 раза, а затем сравнили карты между собой. Оказалось, что они почти не изменились — небольшая миграция активности была, особенно там, где высокие градиенты, но ни о каком повторном загрязнении из-за новых выбросов и речи быть не могло.

Из-за высокой активности на площадке АЭС постоянно велась дезактивация, почву засыпали песком, покрывали бетоном, люди и машины приносили на нее новую радиоактивную «грязь», так что радиационная ситуация постоянно менялась. Как быстро обновлять карты заражения с учетом этих изменений? С первых же дней предлагали использовать люминофоры — скажем, разливать их по земле и по характеру свечения сразу же узнавать распределение активности. Но ведь это дорого, да и чтобы заказать их где-то и привезти, нужно немало времени. Потом возникла простая и красивая идея — воздух тоже в какой-то степени люминофор. Скажем, ионизированный азот излучает ультрафиолет. Мы тут же начали разрабатывать методику ультрафиолетовых съемок, изготовили и наладили довольно хорошую аппаратуру, а затем ночью с высоких точек снимали всю площадку. Таким образом, возникла новая аппаратура и методика исследований. Она нам потом помогла при разведке помещений внутри блока перед дезактивацией: на ультрафиолетовых снимках фиксировались пятна радиоактивной грязи.

Этот пример — один из многих. Кстати, люминесценцию мы использовали в другом новом приборе для быстрого поиска в пробах грунта «горячих частиц». Обычно для этой цели применяют радиографию: на тонком слое почвы закрепляют фотопленку, через сутки ее проявляют и по темным пятнам определяют места расположения горячих частиц. Остается еще найти эти частицы в слое почвы. Мы разработали более быстрый способ: проба рассыпается по люминесцентному экрану, а горячие частицы обнаруживают по светящимся точкам на нем через микроскоп. Этот экспресс-метод позволил собрать и изучить многие сотни горячих частиц.

Сегодня работы в Чернобыле в 1986 г. воспринимаются как пожарные, спонтанные. Наверное, в значительной степени так и было. Только после возведения Саркофага началось систематическое изучение 4-го блока.

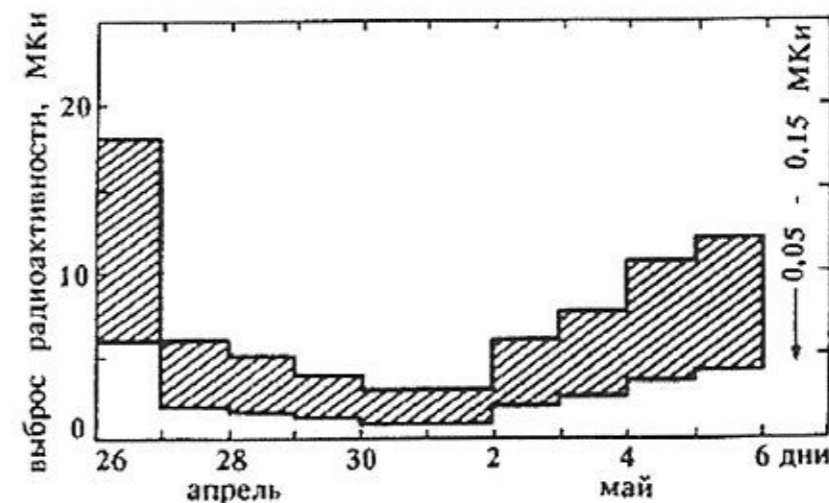
— *Поскольку вначале информация о работах по ликвидации последствий аварии была не слишком подробной, вокруг этих работ возникло множество мифов и слухов, которые ходят и до сих пор. Хотя некоторые из связанных с ними вопросов, возможно, покажутся вам некорректными или даже неграмотными, хотелось бы все же задать их вслух и получить ответ. Прежде всего, у многих вызывает сомнение официально объявленная величина выбро-*

са — 3,5 % топлива. В докладе МАГАТЭ указано, что из реактора выброшено около трети графита, а поскольку топливные стержни насквозь пронизывали графитовую кладку, многие усматривают противоречие между этими двумя величинами. Быть может, объяснить это противоречие можно так: сколько выброшено топлива при взрыве, сказать трудно, но после очистки крыши, площадки АЭС, самого блока под Саркофаг действительно удалось собрать 96,5 % топлива?

— Давайте прежде определим, что понимать под словом «выброшено». Если иметь в виду «выброшено из шахты реактора», в том числе в соседние помещения, в центральный зал, в подреакторное пространство, на ближайшие крыши — то оценить такой выброс действительно сложно. В конце концов, сейчас мы видим, что в самой шахте реактора почти ничего не осталось — можно считать, что в этом смысле выброшено все. Но говорит ли о чем-нибудь такое понятие «выброса»? Я считаю, что мы должны учитывать не ту активность, которая была собрана управляемыми бульдозерами, сброшена в завал с крыш, укрыта во временных хранилищах, залита бетоном при строительстве Саркофага, а только ту, которая осталась на землях Украины, Белоруссии, России и создаст радиационный фон. Она измерена надежно, известно даже, сколько ее выпало в Европе, США, Японии, сколько рассеялось над просторами океанов. Что касается выброшенного графита, то у меня вызывает сомнение точность оценки. Я бы не строил рассуждения на одной непроверяемой цифре, принимая ее за аксиому. Графит горел много дней, и, думаю, никто не знает, сколько его было выброшено на окрестности, а сколько сгорело или лежит в центральном зале, куда мы долго не могли проникнуть.

И второе соображение. Надо различать выброс топлива и выброс радиоактивности, это не одно и то же. Мы знаем, сколько и каких радиоактивных изотопов образовалось в каждом грамме топлива. Во время взрыва часть диспергированного топлива вместе с содержащейся в нем радиоактивностью была выброшена в атмосферу. Это «топливная» компонента выбросов. Ее характерная особенность — фиксированный набор радиоактивных изотопов, связанных в урановой матрице. Типичные «топливные» нуклиды — плутоний, церий и в значительной мере стронций. Однако во время аварии топливо нагревалось до высоких температур, и при этом летучие элементы (в частности, иод и цезий) выходили из топливной матрицы в виде летучих радиоактивных выбросов. «Топливная» компонента в основном выпала в 30-километровой зоне, а летучие выбросы распространялись на большие расстояния, образуя там, где были сильные осадки, интенсивные пятна загрязнений. Когда мы говорим о выбросе 3,5 %, то это относится к нуклидам топливной компоненты. Что касается летучих нуклидов, то их выбросы следует определять индивидуально.

Самым главным было определить выбросы наиболее опасных для человека нуклидов — иода, цезия, стронция и плутония. В первое



Выброс радионуклидов из 4-го блока на активной стадии аварии. Заштрихованная часть гистограммы соответствует погрешности измерений.

время особенно важен был плутоний: по нему нормы особенно жесткие. А измерять его непросто, так как он излучает не γ -кванты, а только α -частицы. Требуются предварительно сложные радиохимические реакции для его выделения, а лишь после этого — измерения на α -спектрометре. Это неделя хорошей работы для квалифицированной группы радиохимиков и спектроскопистов. Ясно, что на основании таких анализов оперативно снять карту загрязнений плутонием невозможно — во всей стране не хватит специалистов.

Чтобы стало ясно, насколько это тонкая работа, приведу пример. Как-то нам присылают результаты анализов из одного очень хорошего института. Там вдруг нашли огромные количества плутония в почве. Но что удивительно: из блока примерно в равной пропорции выброшены три изотопа — ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu , а в анализе присутствует только ^{239}Pu . Оказывается, при анализе пользовались посудой, в которой когда-то работали с этим изотопом, а концентрация плутония в пробах настолько мала, что этого оказалось достаточно, чтобы исказить результат. Случались и другие ошибки. Нам даже пришлось создать специальную бригаду, которая проверяла сомнительные результаты. И соотношение в анализе разных изотопов было надежным критерием достоверности. Скажем, в выбросе присутствовали два изотопа цезия — ^{134}Cs и ^{137}Cs , церия — ^{141}Ce и ^{144}Ce , рутения — ^{103}Ru и ^{106}Ru . Отношение изотопов цезия служило своеобразными «отпечатками пальцев» чернобыльской аварии — оно сильно зависит от выгорания топлива, и анализ этого соотношения помогал выделять чернобыльские осадки на фоне глобальных выпадений от испытаний атомного оружия. Как-то раз нам сообщили из Литвы, что на Куршской косе обнаружили повышенное содержания цезия. Мы организовали экспедицию, проверили. Действительно, цезия там было несколько больше, чем вокруг (хотя и в пределах фона), но, судя по соотношению изотопов, никак не «чернобыльского». Еще более

надежным критерием могло служить отношение изотопов рутения — там две очень близкие спектральные линии на большом сплошном фоне, и чтобы их разделить, нужна очень высокая квалификация и хорошая аппаратура. Если это удалось, значит, анализ проведен достаточно тщательно.

Однако карта заражения плутонием была сделана очень быстро. Помогло то, что тугоплавкий плутоний (температура кипения около 4000°C) надежно связан с урановой матрицей, как и церий, который химически близок к плутонию, но испускает γ -кванты. И все наши анализы показывали строгую корреляцию между содержанием церия и плутония — оба элемента присутствовали в одних и тех же топливных частицах. Поэтому нам удалось, измеряя γ -излучение церия, построить карту распределения плутония. Конечно, коэффициент корреляции мы постоянно проверяли, делаем это и до сих пор.

— *То, что из реактора было выброшено значительное количество активности, во многом связано с длительным горением графита. Но и сам этот пожар вызывает вопросы. Многие недоумевают, почему загорелся графит — ведь температура его воспламенения значительно выше тех 2000°C , до которых, по официальным сведениям, нагрелась активная зона. Некоторые говорят, что роль катализатора сыграл цирконий и что в графитовом реакторе не стоило использовать циркониевые трубы.*

— Я немного интересовался этим, хотя и не химик по образованию. В действительности у графита даже нет определенной температуры воспламенения — все зависит от среды, в которой он находится. Однозначно сказать, почему он загорелся, трудно. Я не исключаю, что в некоторых точках активной зоны были очень высокие температуры и возникли условия, при которых графит мог загореться. Быть может, как-то повлиял и цирконий. Полной картины процессов после взрыва у нас пока нет. Честно говоря, это направление анализа чернобыльской аварии несколько отстает от других. Хотя много экспериментов с графитом уже проведено и множество идей обсуждалось, восстановить происшедшее в деталях еще не удалось.

— *Приходилось слышать самые разные мнения по поводу решения сбрасывать в развал реактора мешки с песком, доломитом, глиной и другими материалами. Одни считают, что это уменьшило выброс активности из блока, другие — что засыпка стала преградой на пути конвективных потоков воздуха через активную зону, поэтому остатки топлива снова начали разогреваться, и этим объясняется некоторое увеличение радиоактивных выбросов на 6-й день после аварии. С другой стороны, говорят, что основная часть сброшенных материалов вообще не попала в шахту реактора.*

— Они и не могли туда попасть полностью — шахта имеет диаметр около 15 м, а сбрасывали мешки с большой высоты. Сейчас мы видим, что шахта почти пуста, и трудно сказать, что произошло с материалами, которые туда попали. На блок было три сильных воздействия — сначала взрыв, потом засыпка с вертолетов и, наконец,

заливка бетоном при строительстве Саркофага, которую вели дистанционно и потому почти не могли контролировать. Сейчас очень сложно разделить результаты этих воздействий — скажем, в расплавах, содержащих окись урана и кремний. Неясна пока и причина увеличения выброса после 2 мая. Наверное, зная состояние блока в деталях, можно рассчитать такую последовательность и технологию засыпки, которая минимизировала бы выброс, но тогда мы не обладали такими знаниями, да и сегодня узнали не все.

Скажем, часто спрашивают, нужно ли было сбрасывать в развал свинец, не загрязнило ли его кипение площадку дополнительно. Но мы внутри блока пока не обнаружили свинца и не знаем, куда он попал или куда ушел, расплавившись. Когда перестраивался машинный зал, оттуда вынимали мешки, сброшенные с вертолетов сквозь крышу, но среди них не оказалось ни одного со свинцом. В подвальных помещениях свинца тоже нет. Может быть, он лежит в центральном зале, завалы в котором еще не исследованы до конца? Нет свинца и вне блока. В конце 1986 — начале 1987 г. на Украине были тревоги, говорили, что кое-где в почве слишком много свинца. Мы специально брали пробы, проверяли. Свинец был, но в обычных природных количествах, не больше. С тех пор сведений о загрязнении свинцом к нам не поступало.

— *Сейчас, когда и неспециалистам стало ясно, что Саркофаг — не окончательное решение проблемы захоронения 4-го блока (раньше об этом как-то не задумывались или не говорили вслух), у многих возникли сомнения в достоинствах выбранного проекта или даже вообще в необходимости такого строительства. Кое-кто утверждает, что лучше было с помощью мощной землеройной техники просто засыпать блок землей, превратив его в гигантский холм.*

— Я в отборе проектов не участвовал и не знаю, как он шел, но мне кажется, было сделано все, чтобы выбрать оптимальный в условиях лета 1986 г. вариант. То, что множество активных обломков, лежавших в завалах с северной стороны, нужно было замуровать в каскадной стене, представляется очевидным. Некоторые другие решения тоже однозначно вытекали из ситуации — скажем, крыша из трубного наката. Вначале хотели сделать свинцовую или бетонную, но расчеты показали, что стены блока не выдержат их веса.

Что же касается идеи засыпать блок грунтом, то мы сразу ее отмели. Это привело бы к полной теплоизоляции топлива, его нагреву и плавлению, так что оно могло либо собраться в массу больше критической, и тогда новый выброс, либо проникнуть в грунт и заразить грунтовые воды. Сейчас топливо выделяет гораздо меньше тепла, чем тогда, и сегодня уже можно обсуждать эту идею вновь. Но я не уверен, что такая засыпка необходима. Это радикальное решение, которое можно принимать только в том случае, если будет остановлен и 3-й блок. Хотя утверждается, что фундаменты 3-го и 4-го блоков не связаны, они находятся рядом, на одном грунте. Была замечена небольшая подвижка турбины 3-го блока после сооружения

Саркофага. Что же будет с этим блоком, если мы засыпем Саркофаг огромной массой грунта?

— Как вы, *Спартак Тимофеевич*, оцениваете научную сторону работ по ликвидации последствий аварии?

— Наука всегда стимулируется проблемами, которые ставит перед ней жизнь, но участники этих работ испытывают удовлетворение не от научных достижений, а прежде всего от того, что они хоть в какой-то мере помогли уменьшить масштабы бедствия. Правда, теперь мы понимаем, что там родились многие новые идеи, были разработаны новые методики и приборы, ценные и с научной точки зрения. К примеру, в застывших подтеках расплавленной смеси топлива с песком или бетоном кристаллографы Радиевого института обнаружили совершенно новый тип кристаллов, новое соединение, которого до этого нигде в мире не встречали. Для рождения таких кристаллов, обладающих очень правильной формой, требуется крайне долгое и равномерное остывание. С другой стороны, это открытие дает нам новые сведения о ходе аварии — мы можем оценить характерные времена некоторых процессов.

Отделение общей и ядерной физики Института атомной энергии к реакторам практически никакого отношения не имеет и до 1986 г. конкретными проблемами атомной энергетики не занималось. Наша область — фундаментальная ядерная физика, физика твердого тела, сверхпроводимость. Почему же мы работали в Чернобыле? Там, как говорят, возникла нештатная ситуация, мы столкнулись с неизвестными явлениями и процессами, к которым нужно было подойти непредвзято, без всяких стереотипов. И оказалось, что фундаментальная наука, навыки исследователя, а не инженера, там были даже нужнее, чем специальный опыт и конкретные знания. Но мы работали с самыми разными организациями, привлекали любых специалистов, и «ведомственных», и «независимых». Всегда ценился сам человек. И, возвращаясь к началу нашей беседы, хочу еще раз подчеркнуть: и хвалить за успехи, и осуждать за неудачи нужно не науку вообще, а людей в науке, с именами которых эти успехи или неудачи связаны. А оценку нашим действиям пусть ставит будущее.

Предисловие к докладу Международного комитета

С.Т. Беляев. Предисловие к Докладу Международного консультативного комитета «Международный чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер». — М.: Издат, 1991, с. 3-10.

Подведены итоги Международного чернобыльского проекта с участием семи международных организаций. В его реализации приняли участие около двухсот ведущих международных экспертов из 25 стран. Презентации Проекта и обсуждению его результатов была посвящена специальная представительная международная конференция, проходившая в Вене 21–24 мая 1991 года. Детальное описание Проекта с изложением методик, полученных результатов и их обсуждением с многочисленными табличными и графическими данными содержится в заключительном техническом отчете, объемом более тысячи страниц. Этот отчет безусловно заслуживает серьезного Изучения специалистами. Наряду с техническим отчетом был подготовлен краткий «Общий обзор», рассчитанный на широкий круг общественности, перевод которого и предлагается читателю.

Зарождение Проекта и хронология его формирования излагаются в «Общем обзоре». Но к этому взгляду «со стороны» необходимо сделать пояснение об обстоятельствах, приведших к обращению Союзного правительства к МАГАТЭ с просьбой о международной экспертизе.

В 1986 году Минздрав СССР установил временные дозовые пределы на первые четыре года после аварии (непревышение 10 бэр в 1986 г., 3,0; 2,5; 2,5 бэр — в последующие три года). В 1988 году Минздравом СССР были разработаны предложения по «концепции безопасного проживания», которая должна была войти в действие с 1990 года. Обсуждение этой концепции (известной как «35-бэрная») совпало с периодом бурной предвыборной общественно-политической активности, в которой чернобыльская тема, только что освобожденная от пут секретности; стала использоваться очень широко. Вместе с обстоятельствами, приведшими к аварии, объектом резкой критики стали и послеаварийные защитные мероприятия. Дискуссия далеко не всегда велась на профессиональном уровне. Более того, мнения специалистов, как представителей «заинтересованных ведомств», просто игнорировались, «признанными экспертами» становились непрофессионалы. Предварительные, не проверенные и часто просто ошибочные или неправильно интерпретируемые «научные данные» стали разноситься средствами массовой информации. В такой «дискуссионной среде» «35-бэрная концепция» стала объектом резкой (в основном эмоциональной, но мало обоснованной) критики, объявлялась «антигуманной».

Эмоциональный накал и характер дискуссий можно проиллюстрировать на примере визита в нашу страну четырех крупнейших специалистов по медицинской радиологии, приглашенных для обсуждения «35-бэрной концепции». Они посетили Москву, Украину и Белоруссию, встречались с учеными, специалистами, депутатами, жителями загрязненных районов. При этом они высказывали и обосновывали свое мнение, что Концепция не вызывает возражений с точки зрения современной науки и ее 35-бэрный критерий для отселения является скорее слишком низким. В белорусских аудиториях их аргументы не были восприняты. Аргументированное несогласие было бы понято и приемлемо. К сожалению, дело доходило до прямых оскорблений, которые уже после отъезда зарубежных экспертов вылились и на страницы печати, и на трибуны высоких собраний. (Кстати, четверо упомянутых экспертов отказались участвовать в чернобыльском проекте. Но сам этот факт, показавший важное значение контактов с населением, был учтен при планировании и проведении проекта.)

Понимая необходимость выработки приемлемой населением «концепции безопасного проживания», правительством СССР было предложено Академии Наук СССР (где с 1986 года действовал Межведомственный координационный совет по научным проблемам Чернобыля) провести обсуждение как «35-бэрной» концепции, так и всех альтернативных предложений и выработать приемлемый для всех заинтересованных республик и организаций вариант. Многочасовые горячие дискуссии, проходившие на Межведомственном совете, привели лишь к относительному и зыбкому согласию, уже подписанное специалистами всех заинтересованных республик и ведомств постоянно изменялось после дебатов на местах.

Учитывая, что основную озабоченность вызывает состояние здоровья населения, были организованы посещения загрязненных территорий экспертными группами ВОЗ и Международного красного креста. Эти группы во время кратких визитов могли составить лишь общее представление о возрастании числа регистрируемых заболеваний и отклонений от нормального состояния здоровья, причем рост отмечался даже по заболеваниям, никогда не связываемым с радиацией. В качестве возможного объяснения были высказаны разные гипотезы: лучшая выявляемость, изменение рациона питания, социально-психологические напряжения и стрессы. Высказывались сомнения и в достоверности диагнозов заболеваний.

Таким образом, в начале 1989 года сложилась ситуация, когда различные группы медиков и ученых (в центре и республиках) не могли прийти к согласию, а население пострадавших районов и средства массовой информации, требуя принятия дополнительных срочных мер, высказывали недоверие как к уже принятым мерам, так и новым предложениям отечественных специалистов и администрации. В этих обстоятельствах в октябре 1989 года последовало обращение правительства СССР к МАГАТЭ с просьбой о проведении широкой международной экспертизы.

Этапы подготовки Проекта и выработки согласованной программы довольно подробно излагаются в «Общем обзоре». Тем не менее, хочу подчеркнуть и пояснить некоторые моменты, важные для правильного восприятия материалов обзора советскими читателями. Тем более, что еще до появления заключительного отчета Проект стал подвергаться критике, вызванной, в лучшем случае, неполной информацией или непониманием.

Кто проводил экспертизу и несет за нее ответственность? Не МАГАТЭ и не другие международные организации-участники проекта. Они организовали Международный консультативный комитет (МКК), в который вошли ведущие эксперты международных организаций и известные ученые — специалисты из 10 стран. С момента создания МКК на него было возложено руководство Проектом и вся ответственность за его планирование и результаты. Таким образом, результаты Проекта, как и ответственность за них, адресуются исключительно международной группе независимых экспертов. Список руководителей групп экспертов приводится в данной публикации. Замечу, что независимая гласная экспертиза с персональной ответственностью членов группы за результаты — обычная мировая практика. (У нас, к сожалению, на «кухне» официальных решений практикуется анонимное использование экспертов, что освобождает их от персональной ответственности даже при явном непрофессионализме. Самые высокие постановления и законы нередко содержат очевидные для профессионалов нелепости, спросить за которые некогда.)

Кто финансировал Проект? Правительством СССР было издано специальное распоряжение, которым предлагалось ведомствам и организациям страны способствовать проведению Проекта и выделялось 1,5 млн. рублей для покрытия расходов по приему приезжавших групп экспертов и обеспечения их работы. Организационное и техническое обеспечение работы экспертных групп поручалось Министерству атомной энергетики и промышленности (МАЭП). Эксперты — участники Проекта не получили никаких дополнительных гонораров за свою работу. Их институты, университеты оплатили время, отрываемое у них Проектом от основных занятий, а также предоставили необходимое оборудование, приборы и материалы.

Проведение Проекта было бы невозможно без участия в его мероприятиях многих организаций и специалистов нашей страны. Кроме непосредственного участия в экспедиционной работе экспертных групп, задача состояла в подготовке необходимой для экспертизы информации. Общая координация этой работы была поручена Межведомственному совету АН СССР по научным проблемам Чернобыля.

Следует признать, что качество наших статистических и информационных материалов, представляемых экспертам далеко не всегда соответствовало требуемым стандартам. Особенно это относится к медицинскому разделу. Именно неполнота медицинской статистики, ее низкое качество и несоответствие международным стандартам не позволило провести прямое сравнение состояние здоровья населения

в загрязненных районах до и после аварии. Поэтому был принят метод одновременного сравнения здоровья населения в загрязненных и «чистых» населенных пунктах, принятых за контрольные.

Проект был разбит на пять отдельных задач, которые выполнялись одновременно независимыми группами специалистов. Были использованы три основных метода: экспертный анализ официальных и неофициальных данных наших организаций, групп и отдельных специалистов; собственные исследования на местах; информационные и образовательные семинары для специалистов и практических работников с демонстрацией новых методик.

Данные и методики наших специалистов по контролю загрязнения окружающей среды и сельхозпродуктов радионуклидами цезия в основном были подтверждены экспертизой. Отмечено систематическое завышение оценок загрязнения стронцием. Отмечено также систематическое завышение прогнозируемых доз по сравнению с реально получаемыми населением. Не нашли подтверждения заявления о повышенном содержании свинца в крови человека.

Центральной задачей Проекта являлась, безусловно, оценка здоровья населения. Ее планирование и проведение заслуживает самой высокой похвалы и тщательного методического изучения специалистами-медиками. С другой стороны, именно выводы этой группы вызвали критическое или настороженное отношение. Вопрос этот представляется мне принципиальным и заслуживающим обсуждения.

Что исследовано медицинскими экспертами и какие сделаны выводы? Выполнено комплексное обследование представительных групп населения как в загрязненных населенных пунктах, так и контрольных. Проводилось как общее обследование состояния здоровья, так и углубленное лабораторное исследование для выявления, в частности, нарушений в области гематологии, иммунологии, функций щитовидной железы, сердечно-сосудистой системы. Не обнаружено никаких значимых различий в состоянии здоровья населения между загрязненными и контрольными (чистыми) районами.

Именно этот вывод является главным объектом критики со стороны определенных общественных групп и средств массовой информации, которая началась еще до официального представления Проекта на Международной конференции в Вене. Не чувствуя ни права, ни необходимости выступать в защиту результатов, полученных экспертами, хочу лишь сделать несколько пояснений, которые, возможно, помогут думающему читателю прийти к своему собственному заключению. (Текст «Общего обзора» написан специалистами, не имеющими опыта диалога с нашей общественностью и не осознающими интенсивность шумового фона противоречивой информации, в котором мы сегодня живем.)

(1). Кого и как выбирали для обследования и как оно было организовано?

Обследовать всех жителей было нереально. Поэтому были выбраны (строго случайно) в каждом населенном пункте (семи загрязненных и шести контрольных) примерно по 20 человек в каждой из

5 возрастных групп (дети 2, 5 и 10 лет и взрослые 40 и 60 лет, строго по определенному году рождения). Возраст обследуемых был выбран из соображений наибольшей восприимчивости к тем отклонениям от нормы, об обнаружении которых сообщалось ко времени начала Проекта. Местное население с большим интересом и доверием следило за работой зарубежных медиков и было большое число желающих, не из числа отобранных, также пройти обследование. Их просьбы по возможности удовлетворялись, но результаты, естественно, не вошли в основную статистику, а использовались для контроля общих выводов. Всего было обследовано 1356 человек из основных групп (а всего обследовалось в среднем 250 человек в каждом населенном пункте). Хотя обследование было выборочным, но оно вполне репрезентативно и дает общую картину состояния здоровья всего населения. И не только в обследованных поселках, т.к. они также выбирались в значительной мере произвольно.

(2). Хотя практически никаких различий в состоянии здоровья населения в загрязненных и контрольных районах не обнаружено, но само здоровье не идеально. Как отмечается, до 15 % взрослого населения нуждается в медицинской помощи. Психологические напряжения и стрессы распространяются далеко за пределы загрязненных районов.

(3). Результаты, полученные экспертами, надежны. Однако получены они при определенных условиях. Поэтому следует иметь в виду их ограниченность, о чем предупреждают сами авторы «Общего обзора».

Во-первых, хотя обследование каждого пациента было довольно детальным, но тем не менее не исчерпывающим. Главное внимание уделялось вполне определенным заболеваниям и симптомам. (Сегодня обсуждаются новые проблемы, например, отягощение беременности, что не входило в программу Проекта и не могло быть выявлено из-за отбора исследуемых возрастных групп.)

Во-вторых, среди затронутых чернобыльской аварией есть особо выделенные группы населения: эвакуированные из ближней зоны в первый месяц аварии и ликвидаторы. В исследованных поселках их практически не было. Очевидно, что распространять выводы экспертизы на эти особые группы некорректно.

В-третьих, было проведено, по существу, одноразовое эпидемиологическое обследование. Получена оценка здоровья на осень 1990 года, но не в динамике. Хотя по результатам обследования были указаны возможные отдаленные последствия чернобыльской аварии и соответствующие группы риска.

Основной аргумент в критике выводов экспертизы — их несоответствие данным медицинской статистики, которая охватывает значительно более широкий круг населения, чем любое выборочное обследование. А, как сообщается, число регистрируемых заболеваний в чернобыльских районах растет в сравнении с другими районами. Чтобы правильно оценить этот аргумент, следует иметь в виду несколько обстоятельств.

Прежде всего, важнейшее значение имеет качество статистики. Проект предусматривал и экспертизу данных медицинской статистики. В техническом отчете анализируются представленные экспертам данные. Многие из них противоречивы и не выдерживают критики. (Так, отмечался большой рост анемий в Могилевской области с 107 случаев в 1987 г. до 834 в 1988 г. в то время как в соседней Брянской области было 122 случая в 1987 г. и только 25 случаев в 1988 г. Как замечают эксперты, такие несоизмеримые и несравнимые различия трудно принять. Пример другого типа: лейкозы и их тип не учитываются отдельно, а только в группе с другими онкозаболеваниями крови. Поэтому при анализе первичных материалов, оказалось, например, что из 14 зафиксированных в Брагинском районе БССР случаев только 8 оказались истинными лейкозами, из которых 6 хронического типа, никогда не связываемого с радиацией.) В рекомендациях медицинского раздела «Общего обзора» изложены предложения о совершенствовании методов и систем сбора статистических данных и приведении их к международным стандартам.

Другое обстоятельство связано с основной статистикой — врачом-диагнозом. При его постановке трудно исключить субъективный фактор. Руководитель группы медицинских экспертов американский врач-радиолог Ф. Меттлер очень ярко высказался по этому поводу в дискуссии на конференции в Вене. В одном районе — один врач, в другом — другой. Разный опыт, школы, методики, аппаратура. Здесь — радиация, люди в неуверенности, боятся за свое здоровье, поэтому обращения к врачам много чаще. Естественно, и выявляемость заболеваний выше, тем более, что обеспеченность диагностической аппаратурой значительно улучшилась. Кроме того, люди обеспокоены, ищут у себя симптомы заболеваний, о которых кругом говорят и пишут — идут к врачу. Врач вроде ничего определенного не находит, но... — радиация вещь непонятная! — поэтому склонен скорее согласиться с пациентом, чем разубеждать его (как непременно сделает его коллега в обычных условиях). Что даст в этих условиях прямое сравнение статистики по разным областям?

Принципиальное отличие проведенного эпидемиологического обследования от простого сравнения данных медицинской статистики как раз и состоит в том, что во всех обследованных районах, как загрязненных, так и контрольных, обследование проводилось практически в одно и то же время, одними и теми же специалистами по одним и тем же методикам и использованием одной и той же аппаратуры и препаратов, причем со случайным выбором обследуемых среди жителей, а не среди добровольных пациентов.

Каждое эпидемиологическое обследование — это единый проект, проводимый одной хорошо управляемой и координированной группой специалистов. Поэтому его масштабы всегда ограничены. (Но и при этом стоимость сравнительно высока. Медицинское обследование, масштаба проведенного, оценивается западными специалистами в 2 миллиона долларов.) Нереально требовать проведение эпидемиологического обследования всего населения в загрязненных районах.

Следует выделять группы риска, у которых ожидаемые эффекты проявляются наиболее явно.

Важнейшей задачей в каждом эпидемиологическом проекте является выбор группы для обследований. Для Чернобыля к группе риска следует отнести переселенных в первый месяц после аварии, особенно детей с большой дозой на цитовидную железу, а также ликвидаторов первых месяцев. О важности организации серьезных эпидемиологических проектов, в том числе международных, по обследованию этих групп говорилось и при обсуждении Проекта в Вене.

Возникает вопрос, почему именно обследование этих групп риска не составило программу Проекта, разве до его начала не было ясно, что основными группами риска являются именно отмеченные выше? Для специалистов это было очевидно. Почему же именно эти группы не стали предметом обследования? К сожалению, задачи проекта определялись не только и не столько с научных позиций.

Как уже отмечалось выше, результаты экспертизы были очень нужны для обоснования долгосрочной программы ликвидации последствий аварии. Принятия такой программы настоятельно требовали как законодательные органы, так и общественные движения, стимулируя активность средств массовой информации и в свою очередь стимулируясь этой активностью. Поэтому объектом экспертизы стали именно районы, положение в которых было предметом споров и где население находилось под постоянным психологическим давлением.

Тем не менее, результатов международной экспертизы ждать никто не стал. Еще в ходе проведения Проекта правительство приняло постановление о льготах и компенсациях, а Верховный Совет — Программу неотложных мер с массовыми переселениями (по масштабам превосходящими эвакуацию 1986 года).

Одной из задач Проекта была оценка защитных мер. В рамках этой задачи эксперты оценили и эффективность Программы неотложных мер и систему льгот и компенсаций. Читатель сам может ознакомиться с их выводами. Но один вывод необходимо особенно подчеркнуть: необоснованность столь массовых переселений. Причем не только с точки зрения экономической (т.к. значительно более эффективны вложения средств в улучшение здравоохранения), но и непосредственно для здоровья самих переселяемых. Ущерб для здоровья от переселения может быть значительно большим, чем от дополнительной малой дозы облучения на старом месте.

Каково значение проведенной международной экспертизы и какие уроки из нее следует извлечь?

Прежде всего, Чернобыльский проект по объему и интенсивности проделанной работы, четкости планирования и координации разносторонних исследований явно уникален в практике целевых международных проектов. Советская сторона продемонстрировала открытость и готовность нелицеприятного обсуждения своих проблем с мировым сообществом. Со своей стороны, международные эксперты показали желание и готовность оказать бескорыстную помощь в ре-

шении наших проблем, открыто критикуя наши недостатки, делаясь опытом мирового сообщества. В результате длительной совместной работы наши ученые и специалисты получили полезный опыт и ознакомились с международными методиками и стандартами.

По результатам Проекта намечались новые направления для международного сотрудничества с целью преодоления последствий Чернобыля и извлечения уроков из этой беды для всего международного сообщества. Были высказаны и конкретные предложения, хотя их практическая реализация будет во многом определяться восприятием нашей общественностью той огромной и бескорыстной работы, которая была выполнена участниками Чернобыльского проекта. Уже очень привычны стали в нашей демократической действительности судилища над объективными научными фактами и нет еще недостатка в ученых лжесвидетелях.

Именно поэтому самым важным, на мой взгляд, уроком для нас является демонстрация экспертными группами высокого профессионализма и ответственности, которые так необходимы представителям науки при решении проблем, возникающих в обществе. Тщательный критический анализ полученных данных, многосторонний контроль и оценка их достоверности, с одновременным пониманием области применимости и ограничений. Только после этого можно говорить о научном результате. И он не может искажаться в угоду любым, даже самым «гуманным» политическим схемам. Факты надо принимать такими, какие они есть. Только политика, построенная на реальности, может быть гуманной.

Decision process followed by the USSR up to 1991

S.T. Belyaev. Decision process followed by the USSR up to 1991 and analysis of the main restoration activities. — In: Nuclear Safety and the Environment. (Proc. of the Workshop on restoration strategies for contaminated territories resulting from the Chernobyl accident. Compiled by L. Cecille.), DG Environment of the European Commission, Brussels (Belgium), EUR 18193 EN, November 2000.

Chernobyl turned out to be not only a large scale radiological disaster, but also social and psychological one of even the larger scale. The scale of social agitation after Chernobyl was enormous. Was it possible not to reach such a situation? What was wrong in decision making, planning and execution of countermeasures? What kind of lessons should be learned for the radiological protection? And what should be done for social restoration and rehabilitation?

The scale of Chernobyl accident and extraordinary unstable political situation in the country were important reasons for not optimal and even erroneous performance. Nevertheless, some more general lessons follow from the experience collected which need critical reconsiderations of radiological protection principles.

A non-optimal, or wrong, strategy in post-accident management can aggravate essentially the situation as a whole. In this context it is instructive to consider the chain of decision making and corresponding feedback events after the Chernobyl accident.

Outline of events

- 26 April
 - evacuation of 50.000 residents from the town Pripjat (4 km from the Chernobyl NPP) and then from other settlements in the vicinity of the Chernobyl NPP.
- 30 April
 - drawing out a map of radiation conditions near the Chernobyl NPP and the adjoining regions of the Ukraine and Byelomssia with isolines from 5 mR/h and up.
- 5 May
 - the first map of ground contamination.

- 10 May

- the more detailed map of gamma-field with isolines from 0.5 mR/h and up. On the basis of this map and established dose limit 10 rem for the first year, the following zone scheme were suggested by the Ministry of Health and the State Committee for Hydrometeorology:

- * an exclusion zone (above 20 mR/h; about 400 sq.km) where even temporal stay of people is prohibited;
- * relocation zone (above 5 mR/h; 1100 sq.km), where the stay of shift personnel engaged in eliminating the consequences of the accident is only authorized;
- * a controlled zone (3 to 5 mR/h; about 3000 sq.km) with temporal relocation of children and expectant mothers, strict radiological survey and exclusion practically the consumption of local food products.

At the beginning of May the isotopic composition of radioactive fallout was determined for three directions of air-mass transport. This allowed to estimate (by NCRP methods) the first-year and 50-year external doses for the population of the main contaminated regions.

July-August: State Committee for Hydrometeorology submitted detailed maps of contamination by Cs-137, Sr-90 and Pu-239, 240. These maps became the basis for decision on additional relocation of residents from some settlements (from 29 settlements in Byelorussia, 4 in Russia and one in the Ukraine).

In 1986 relocated were in all 116.000 people from 188 settlements (including the town of Pripyat).

Effectiveness of the measures implemented (as was seen at that time)

By the end of 1986 the situation had seemed to be fully under the control:

- the necessary relocations were made;
- the territories affected by the accident were zoned;
- the continuous monitoring of radiation situation and the control of food supply were arranged;
- the delivery of clean foodstuff was organized to the regions where consumption of local food products was restricted;
- mass decontamination of settlements was under way;
- measures on improvement of the medical servicing of the population have been taken.

Specialists are convinced that the established dose limits (10 rem for the first year, 3.5 rem for the second year and 2.5 rem for each of the third and fourth years) will not be reached in non-relocated settlements.

In 1988 Ministry of Health worked up propositions on a «concept of safe living» to be introduced since 1990.

All decision making and measures implementation were promptly coordinated by the governmental commission with an operational group working in Chernobyl.

Oversights and errors

The scope and efficiency of the works performed were unprecedented. However, reviewing today in retrospect that early period of the post-accident activity some omissions and mistakes should be noted. Later they gave cause for sharp aggravation of the social situation around Chernobyl.

It should be noted, first of all, that iodine prophylaxis for the first weeks of the accident was organized unsatisfactorily and on quite insufficient scales. This led to mass overexposure to the thyroid, particularly among children.

Secondly, the relocations did not turn out to be well-grounded everywhere. In some settlements it was possible not to relocate the population and, on contrary, it was necessary to include other settlements into the relocation list. In 1988 basing on the «35-rem concept» Ministry of Health planned to relocate additionally about 12.000 residents from 63 settlements.

Finally, information of the public was insufficient and one-sided which promoted the spreading of rumors and gave rise to distrustful attitude to the statements of specialists and administration. During the period the details of the radiation situation and the countermeasures were not published by mass media and were available only for organizations engaged in post-accident activity. There was no information at all in mass media about some regions with visible contamination (mainly in the Russian Federation). Closed official information service was used for practical purposes; data on local radiation conditions were received by local authorities to inform the population and take necessary measures.

The situation goes out of control

Everything began to drastically change in 1989 when the Chernobyl data were declassified. In early 1989 the central press published the detailed maps of contaminated regions, data on received and projected doses and possible health effects.

On the wave of violent pre-election political activities aroused in the country at that time, the speculations on the Chernobyl tragedy became customary. The opinions of specialists, marked as «lobbyist of interested departments», were simply ignored and non-professionals became «recognized experts». The preliminary, unconfirmed and often

mistaken or improperly interpreted data (particularly, those concerned with public health) were speeded by mass media. A «35-rem per life» criterion suggested by NCRP and Ministry of Health as a criterion of safe living became the target of acute criticism, was named «anti-human» and «socially criminal».

Countermeasures under political pressure

Realizing the necessity to have a legitimated «safe living concept» in order to elaborate a program for additional measures, the USSR government suggested that the USSR Academy of Sciences would discuss both the «35-rem» concept and all alternative proposals, and to work out a variant acceptable for all interested republics and organizations.

To calm the society, the government made also some steps towards the more open analysis of the situation.

The groups of experts from World Health Organization (June 1989) and from League of Red Cross and Red Crescent Societies (in early 1990) visited the contaminated areas. They noted the growing indices of medical statistics even for diseases never associated with radiation. Several hypotheses were put forward as a possible explanation: better screening, change in diet, psychological anxieties and stresses. Some doubts in the reliability of diagnoses were expressed. However, the conclusions of the WHO and ICRC experts as are other weighted opinions were mentioned only casually by mass media which gave preference to sensational unmasking motives.

Eventually in October 1989 the USSR government appealed to IAEA for help to conduct of «international experts assessment of the concept which the USSR has evolved to enable the population to live safely in areas affected by radioactive contamination following the Chernobyl accident, and an evaluation of the effectiveness of the steps taken in these areas to safeguard the health of the population».

It took about a year to carry out the project. Its findings were reported at the conference in Vienna in May 1991. The conclusions of the International Chernobyl Project are known. The main of them is: no differences are observed between the health of the populations living in the contaminated and control areas.

But the USSR government did not (and maybe could not) wait for the results of the International Chernobyl Project. In order to calm the population in the areas affected by Chernobyl a Decree was issued for payment of benefits and compensations in accordance with the zone of living (5–15 or 15–40 Ci/sq.km).

In April 1990 the Supreme Soviet adopted a two-year program for urgent measures (for 1990–1992). Initially the program implied to relocate 73.000 people, but then after the negotiation with the republics this figure was increased up to 210.000. The Supreme Soviet charged also the government with the preparation of a long-term program based on the scientifically justifiable concept of safe living.

April 1991 — the USSR Cabinet of Ministers approved the prepared conception. The USSR Supreme Soviet passed the Law on social protection of people affected by the accident. The analogous, though different in some terms, laws were passed earlier in all three republics. They are still acting today.

Main provisions of the Law which was acting in the Russian Federation

The Law is intrinsically contradictory. On the one hand, it establishes intervention levels based on doses:

- average annual effective doses less than 1 mSv are permissible and require no intervention;
- from 1 to 5 mSv — countermeasures without relocation are required;
- above 5 mSv — mandatory relocation.

On the other hand, several zones of special regime are established depending on the contamination level (Ci/sq.km of Cs-137):

- exclusion zone where permanent residence, economic activities and use of natural resources are prohibited (the area evacuated in 1986);
- relocation zone — with contamination above 15 Ci/sq.km. Where it is higher than 40 Ci/sq.km, relocation is mandatory, otherwise — voluntary;
- inhabitable zone with the right for relocation — 5 to 15 Ci/sq.km;
- inhabitable area with a preferential socio-economic status — from 1 to 5 Ci/sq.km (besides, the annual dose must be less than 1 mSv).

For each zone the Law determines control measures as well as social benefits and financial compensation for the population.

Necessary comments. The zones differ strongly in size:

The area with contamination above 15 Ci/sq.km includes 206 settlements with a total population of 82.000 exclusively in the Bryansk Region.

The 5 to 15-Ci/sq.km area includes 489 settlements with a total population of 211.000 in four regions.

The 1 to 5 Ci/sq.km area includes 3.588 settlements totalling 2.323.000 people in 12 regions (including the Leningrad Region). In this greatest area the average annual doses do not exceed, as a rule, 1 mSv and, according to the Law, are quite permissible and need no intervention.

Thus, during 1988–1991, as a result of escalation of the socio-political pressure, the post-accident realities were fully revised. The scale of territories and population «affected by Chernobyl» as well as the volume

and cost of the countermeasures taken and planned were extremely increased. On the other hand, the extension of the measures being taken led in turn to the socio-psychological agitation of increasingly wider groups of the population.

Questions to radiological protection concepts

«Classical» principles of radiological protection are based on radiation doses, intervention levels and effective countermeasures. Clear and logical in principle, this simple scheme ignores other (mostly social) factors which do come in for large accidents involving an important part of the population. So, radiological principles need a specific clarification on each post-accident period.

There are two distinct phases in post-accident management:

- short-term acute phase, which may and should be managed following pre-prepared emergency plans and radiological criteria, and
- long-term phase, when the detailed strategy may be formulated based on specific data collected and dynamics of processes understood. Manifestation of social dimension is very important characteristics of this phase.

Post-accident management on the first acute phase is unavoidably led by pre-established radiation protection criteria. Shocked by an accident, individuals involved and society as a whole are ready to rely on administration and professional actions and ready to accept constraints and higher level of risk than in normal situation. It is the acute post accident phase where radiological criteria and policy may be fully executed. Reaction of the population in this period does not yet evolve into social debate on negligence and responsibility. Time is needed for active «opposition» to formulate questions, collect «alternative data» and «views of other specialists».

Effectiveness of post-accident management in acute period, positive results evident for public may minimize public critical movement and even stop it. Ineffective management, uncertain strategy and absence of dialog with public may, on the other hand, accelerate and increase social excitation which, in its own turn, will prevent optimal management in the next long-term period.

A detailed legislation base is very important for effective management in acute phase. It gives solid base for assured actions to all participating bodies. New regulation introduced after accident may create social distortion and distrust to ruling bodies.

In the long-term phase general radiological principles and criteria need a specific clarification. First of all, one needs a reliable prediction on future dynamics of radiological situation and effectiveness of specific countermeasures. Most of the dynamical data critical for decision making are case and area dependent and the time needed for providing measurement and analyses. Natural «self cleaning» processes and their time scale,

which are crucial for dynamical dose prediction is not the only example of the kind. Efficient strategy for long-term phase depends crucially on the inquiry of those data and processes.

Another specific feature of long-term phase is that the situation can hardly be kept in pure radiological framework when the human factor comes fully into force. The human factor implies the psychological and social acceptance, by the public, of the countermeasures to be implemented and the response of the public to their implementation, the reflection of the situation by mass media, the reaction of legislative and administrative bodies, etc. Even scientifically optimal countermeasures need social understanding and support. It is crucial to persuade the public for correct measure but not to sacrifice it for political speculations. It may lead in the future to more serious complications.

After-Chernobyl history and practice give instructive examples of interconnection and contradiction of radiological recommendations with socio-psychological, political and legislative factors. One very important and painful example is relocation criteria and policy. This problem can not be solved in frames of radiological criteria only, and certainly needs inter-disciplinary approach with weighting risk assessment of different nature. The practice also shows a drastic deviation between risk scientifically reliable and that acceptable by public.

It does not mean that human factor can be fully eliminated by a perfect decisions and management. Post-accident syndrome with psychological stresses is an objective reality for large-scale accidents.

This fact should be considered in planning and execution of radiological measures. Countermeasures with the highest averted doses may result in psychological stresses with higher risk for health than averted radiological risk. The optimization of the countermeasures becomes a multi-variable problem. The goal of the optimization changes. A minimization of risk to health becomes more rational index than averted dose. And, besides the radiological protection and rehabilitation, there appears a problem of social protection and social rehabilitation.

However, the lack of accurate quantitative measures for the risk from other than radiological factors (from psychological stress, etc) creates some difficulties in optimizing the countermeasures, in particular in the case when a measure acts on different factors in opposite directions (e.g., reduces doses and at the same time enhances the social and psychological tension as in the case of restrictions on living style).

A second complication for «human» variables is their broad personal variation. Even within a uniform population group there exist differences in the perception of the countermeasures depending on the personal psychological character, family composition, resistance to rumors and frightening information, etc.

One useful and promising solution was executed in Chernobyl practice: for psychologically sensitive countermeasures to let each person or family to make their own voluntary selection. In fact, it corresponds to self-measuring the place on psychological scale. One of Chernobyl lesson is that everywhere, if possible, mandatory administrative measures

and restrictions must be rejected in favour of voluntary ones which are consciously accepted by the population or individuals.

Another feature of the long-term stage is a display of time variability of radiological, social and political environment, the necessity to follow up the changes and forecast feedback from decision making. A non-optimal, or wrong, strategy at the long-term stage can aggravate essentially the situation as a whole. Unfortunately the history of post Chernobyl management has a lot of such negative examples.

For large accidents time scale is an important factor in radiological protection. It should be taken into account when planning countermeasures. Sometimes theoretically effective countermeasures cannot be made in proper time due to practical possibilities and delay may drastically change the value of the countermeasure and sometimes even change sign. (One real example: relocation of large scale was announced in 1990. For many settlements it was delayed for 2–3 years which were for the residents the years of stresses and social and economic degradation.)

In «classical» radiological framework excessive countermeasure may be expensive but not harmful. Sometimes they say of «conservative levels». In real human background such policy may be very dangerous and Chernobyl has given a lot of examples. In planning and implementation radiological countermeasures both their insufficiency and their excessive redundancy are equally dangerous. In the latter of these cases a suspicion of more serious consequences of the accident than those officially announced could be aroused. This can create a panic, a non-confidence to specialists and demands to take additional protective measures.

This is also true for measures of social protection. In their planning and implementation it is also important not to overstep the limit of reasonable sufficiency. This rule was neglected in post-Chernobyl management. Vast territories populated by millions were officially (by law) given status «affected by Chernobyl» with corresponding payment of benefits and compensations. Now almost everybody consider the situation as unsound. Restoration of normal life and vital activity is needed.

Transition from post-accident period to a normal life is complicated in any case due to socio-psychological difficulty to accept residual effects (contamination of land and additional though small doses remain). A special legislation and strategy is needed for this transition period. This is one of the most important problems for post-Chernobyl management today.

Where and when there would be a time boundary between post accident era and normal period? It is evident that in most cases it is impossible to return to pre-accident conditions. Maybe these areas should be considered and officially declared as areas with normal, though different natural environment. Information on desirable precautions should be made, but no other mandatory restrictions should be imposed.

The most of the so called «Chernobyl territories» are not worse than many others. There is no danger to live there. They have and will have in the future specific features (as well as many other areas have). The

obligation of the authorities is to disclose the full information, maybe to organize an advisory service etc. But not to impose prohibitory laws as it is now. The rest is for free choice of citizens.

The problem is in proper legislation. We (at least in Russia) are now in a complicated legislative trap, which was artificially constructed during former, mostly political, battles. The main obstacle and danger is now in the acting laws, which are aimed to conserve Chernobyl zones with their restrictions, payments of benefits and compensations, which in their turn hamper economic activity and sound social life, create in the population passivity, dependence, alcoholism etc.

How to reach economical and social rehabilitation? And what kind of steps might be made to stimulate this process? The answer may be not universal, but area, district and even village dependent. It would be a good start to initiate, say, a specific pilot project for some settlement. It may consist of an estimate the real situation, environmental, economical, demographic conditions. And then suggest some possible scenarios of progress and their cost estimates, legislative support needed etc. An international status for such a project would be very beneficial since it will make final recommendations more acceptable for the population.

Some lessons learned from Chernobyl

1. Measures of radiation protection must be accompanied with socio-psychological measures aimed at ensuring the calm and adequate perception of the protective measures by the public. Required is a continuous monitoring of not only the dynamics of radiation situation, but also the social processes among the various population groups.
2. In planning and implementation radiological countermeasures both their insufficiency and their excessive redundancy are equally dangerous. In the latter of these cases a suspicion of more serious consequences of the accident than those officially announced could be aroused. This can create a panic, a non-confidence to specialists and demands to take additional protective measures.
3. Complete, reliable and timely information available, understandable and useful to all sections of the public are the necessary and most important part of the system of countermeasures.
4. Everywhere, if possible, mandatory administrative measures and restrictions must be rejected in favour of voluntary ones which are consciously accepted by the population or individuals.
5. Protective measures must be supplemented by measures of social protection. In their planning and implementation it is also important not to overstep the limit of reasonable sufficiency.

Chernobyl was and still is a disastrous event for my country (and for others in fSU) and today we should admit that the scale of this event was to large extend created by the mistakes and omissions in decision making. Let's hope that the lessons of Chernobyl will be learned by the world community (my country included).

Об образовании

Беседа с корреспондентом журнала «Юность»

Беседа с корреспондентом журнала «Юность» В. Ярошенко. Впервые опубликовано в журнале «Юность», 1973, № 5, с. 81–86; см. также: Наука. Академгородок. Университет. Воспоминания. Очерки. Интервью. Вып. 1. — Новосибирск, 1999. с. 76–85.

О проблеме поиска и воспитания талантливой научной смены, о задачах, стоящих перед высшей школой, шла речь в нашей беседе с академиком, известным советским физиком, ректором Новосибирского государственного университета Спартаким Тимофеевичем Беляевым. . .

— *Спартак Тимофеевич, в 1971 г. на XIII Международном конгрессе по истории науки, проходившем в Москве, академик П.Л. Капица в своей речи о Резерфорде говорил, что самое важное и трудное в организации науки — отбор одаренной молодежи и создание условий, в которых талант мог бы развернуться в полной мере. Ведь как часто развитую память, начитанность принимают за творческие способности.*

— Я полностью согласен с формулой Петра Лсониловича. Мне приходилось об этом думать, и я убежден, что прогресс науки в громадной степени зависит от того, сумеем ли мы собрать в вузовских аудиториях талантливых людей и приучить их к самостоятельному мышлению.

Для каждого серьезного ученого предмет гордости и заботы — его ученики. Но самое трудное — найти этих учеников: ведь нет никаких критериев поиска, никаких шаблонов. Талантливый человек тем и выделяется. Что он не похож на других, не подходит ни под какие шаблоны.

— *Но ведь талант как-то проявляется?*

— В том-то и дело, что у одного он проявляется раньше, у другого позже, у одного — в одних обстоятельствах, у другого — совсем в иных. И бывает, что прошло время, упущены возможности, талант так и не раскрылся, пропал втуне. . . Кстати, вы, наверное, знаете, что Эрнест Резерфорд окончил университет в Новой Зеландии. Самому одаренному (первому!) выпускнику предлагали стипендию в одном из университетов Англии. Резерфорд не был первым, он был «запасным» кандидатом. И поехал он в Кембридж случайно. Не откажись «самый одаренный», и, может быть, не было бы того великого Резерфорда, которого все мы знаем.

Я сколько раз с удивлением замечал: в студенте, который вначале абсолютно ничем не выделяется, кроме, пожалуй, своей внешней заурядности, вдруг прорезается что-то, человек становится совсем другим, генерирующим идеи, умницей. А бывает и наоборот: вроде бы много знает, эрудирован, боек, быстро соображает, и ничего

путного из него не получается. Одно дело — усваивать имеющиеся знания, другое — самостоятельно работать в науке.

— *В социологической литературе было сообщение о том, что проводилось изучение нескольких сот работников крупного американского научного центра. Если верить результатам, получается, что связь между успеваемостью в вузе и успешной деятельностью в науке очень неустойчива. Какой ответ на этот вопрос подсказывает ваш опыт?*

— По-моему, связь все же существует. Думаю, что среди ученых, которые в своей области явно чего-то добились, подавляющее большинство имело в вузах хорошие оценки. Хотя я допускаю, что связь со школьными оценками не столь жестка. Ведь школу в отличие от вуза не выбирают самостоятельно. Но. . . если мы проанализируем «научные карьеры» всех хороших выпускников вузов, то, вероятно, получим полный спектр — от блестящих успехов до скромного прозябания. В Америке часто проверяют людей по «ай кью» — коэффициентам интеллектуальности — и пытаются прогнозировать их будущее. Но среди людей с высоким умственным коэффициентом талантливые распределены совершенно хаотически. Этот самый «ай-кью» — условие, необходимое, но не достаточное. Существует еще и проблема измерения «валидности», действительно ли измеряется интеллект, а не начитанность, натасканность, быстрота реакции. Нет, хорошие оценки в вузе или тем более «ай-кью» — еще не индикаторы творческого потенциала.

— *Как здесь, в Новосибирском университете, оцениваются способности студентов?*

— Никак не оцениваются. С большим или меньшим успехом распознаются.

— *И при этом является ли успеваемость решающим критерием при распределении выпускников на работу, при подборе кандидатов в аспирантуру?*

— Видите ли, в нашем университете и распределение, и престиж не только по оценкам. У нас совсем иные принципы. Наши студенты два — два с половиной года проводят в лабораториях институтов. К ним присматриваются, знают, проявился ли у человека вкус к исследованию, возникают ли свои идеи, достаточна ли его научная эрудиция. . . Учитываются и отзывы руководителей кафедр, научных институтов, в которых наши студенты работают, и уровень дипломной работы, наконец, участие в научных конференциях, конкурсах, наличие опубликованных работ. В сумме это и дает что-то. Но гарантий нет, не дает! Мы можем предсказывать крайние случаи: вот из этого студента выйдет крепкий научный работник, а из этого совсем не выйдет. Однако всех студентов так рассортировывать нельзя.

— *Но отбор внутри вузов поневоле ограничен. Видимо, особое значение приобретает поиск способных школьников, ребят из глубинки, пусть хуже подготовленных, но самобытных, ярких, не так ли? Ваш университет первым в стране начал «охоту» на талан-*

ты: уже десятилетие проводятся сибирские олимпиады, привлекающие школьников всей страны; тысячи ребят мечтают о вашей физматшколе — уникальной школе, где лекции читают академики и аспиранты, поэты и музыканты... Забота о будущих студентах, поиск одаренных по всей Сибири стали уже системой, не так ли?

— Увы, это стало системой.

— Увы?

— Всякая система — и наша здесь не исключение — имеет тенденцию сворачивать на легкий путь. Проще всего подбирать ребят натасканных, а не способных. Просто самых подготовленных найти легче, здесь есть формальные критерии, пожалуйста, целый набор: и проходной балл, и средний балл, и наличие грамот. Беда такой системы присма в вузы — ее негибкость, она не дифференцирована по типам вузов, по их задачам в системе высшей школы. Наконец, главное — она не позволяет оценить перспективность поступающего именно для данной профессии.

Вот в газетах шла дискуссия «В вуз — без экзамена!». Разве в этом дело — с экзаменом или без? Пишут, что-де на экзамене у абитуриента стрессовое состояние, нервы напряжены. А разве воля, умение собраться в нужный момент, не растеряться в непривычной обстановке, быстрота реакции не характеризуют человека? Разве эти качества нужны только спортсменам? Бывает, отвечает абитуриент как по писаному. Видно, что и читал много и запомнил прочитанное хорошо. Но вот нужно оторваться от привычных перил чужой мысли и сделать небольшой, но самостоятельный шаг вперед. Вот тут-то нередко и наступает стрессовая реакция.

Мы стараемся противостоять наплыву «подготовленных» ребят. Но это трудно! Какой-то массовый психоз: репетиторы, зубрежка! Печально. Вдумайтесь, это факт, что в стране публикуется огромное количество литературы для поступающих в вузы, подчеркиваю, это книги не для людей, желающих постичь физику, но для поступающих, то есть эти учебники играют чисто утилитарную, подсобную роль. Мало того, у нас огромными тиражами издаются сборники конкурсных задач, и — что не делается, по-моему, нигде в мире — издаются их с решениями. Я считаю, что это совершеннейшая глупость! Ребята не решают задачи, они типы решений заучивают. Дошло до абсурда: несколько лет назад был издан прекрасный курс лекций по физике лауреата нобелевской премии Ричарда Феймана, одного из создателей современной квантовой электродинамики. Дополнительным томом курса лекций издали задачник к нему, так даже здесь ухитрились при переводе поместить решения. Дальше уж некуда!

Все это делает трудным отбор на вступительных экзаменах. Мы стараемся предлагать нестандартные экзаменационные задачи — такие, способ решения которых не выучишь по учебнику; они требуют сообразительности, понимания сути физических законов, независимости и широты ума, умения делать смелые и неочевидные выводы. Но разработка таких задач — дело трудное и долгое...

К сожалению, в нашей стране научное творчество школьников развито слабо. У нас практически нет таких организаций, станций, клубов, где бы развивались исследовательские способности ребят. Разве что станции юннатов, но там воспитывают больше прикладные навыки, чем мышление ученого, то есть умение самостоятельно вести наблюдение, эксперименты, разрабатывать схемы опытов, делать выводы из полученных результатов. Олимпиады же и конкурсы, которые проводятся в нашей стране, слабо стимулируют научное творчество, самостоятельные поиски.

— *А в других странах?*

— В какой-то степени это делается в Венгрии, в ГДР. В США широко известен конкурс фирмы «Вестингауз», который проходит по всей стране. На конкурс там представляют исследования, разработки, проекты, наблюдения — физические, биологические, химические, самые разнообразные, без ограничений. Сорок победителей получают стипендии в лучших вузах страны, большие премии. Не следует думать, будто капиталисты занимаются филантропией, просветительством. Просто фирма хорошо рассчитала и рекламный эффект от такой акции и, главное, ту пользу, которую принесут ей через несколько лет найденные ею талантливые ученые.

Мы пытались на вступительных экзаменах по физике не только предлагать обычные задачи, а демонстрировать эксперименты и просили объяснить, что происходит, давали задачи с качественным разбором процессов, ставили их в самом общем виде.

Проблему раннего выявления способностей мы пытаемся решать, экспериментируя с нашей физматшколой. Ученики регулярно бывают в лабораториях институтов — ядерной физики, геологии, гидродинамики, в химических институтах. Они ведут там и исследовательскую работу. Случалось, что наши ребята выбирали себе направление, специализацию и даже конкретную задачу еще до университета. В вузе они продолжали работу, начатую на школьной скамье.

— *Хотелось бы услышать ваше мнение, Спартак Тимофеевич, по одному очень сложному вопросу. Социологи, исследующие проблемы образования, утверждают, что сейчас, когда профессии повсеместно усложняются, для успешного жизненного продвижения становится все более необходимым высокий уровень образования. А значит, сроки так называемой «социализации» все удлиняются, и, как не парадоксально, нынешняя «независимая молодежь» дольше находится в зависимости от родителей, чем молодежь предыдущих десятилетий. Да и само понятие «молодежь» все больше расширяется. В романах начала века двадцатилетних называли зрелыми, теперь тридцатилетних называют молодыми. Но если сохраняется зависимость от родителей, в чем проявляется здесь разница между семьями?*

— Природа сама по себе, слава богу, очень демократична — талантливые дети рождаются в самых разных социальных условиях с одинаковой частотой. Однако спору нет, от культурного микроклимата семьи зависит очень многое. Добавьте сюда и разный уровень школь-

ной подготовки, который зависит и от географического расположения школы, и от квалификации учителей, и от структуры ребячьего коллектива, и еще от множества причин. В результате явное неравенство шансов при поступлении в вуз даже для равно способных ребят. Да, «бурный поток» репетиторства и натаскивания работает очень односторонне и избирательно. В последние годы эта проблема привлекла внимание. Были сделаны определенные изменения в правилах приема в вузы, созданы подготовительные отделения. Однако мне представляется, что простой корректировкой шансов проблему решить нельзя. Корень ее гораздо глубже — в школе.

Мы стараемся находить способных ребят, примечать их на олимпиадах. Но в университет, в нашу физматшколу — ее называют ФМШ — мы приглашаем и тех, кто не попал в число призеров. Это ребята с хорошими задатками, но по разным причинам не получившие пока возможности раскрыть свои способности в отдаленных сельских школах и рабочих поселках. Некоторые из этих ребят росли в неблагополучных семьях. В нашей ФМШ за два-три года они получают требуемые для университета знания.

Большие надежды мы возлагаем на нашу заочную школу, в которой занимаются сейчас свыше двух тысяч ребят. Хочу подчеркнуть, что важно работать не только со школьниками. Мы слишком много ругаем учителя и слишком мало ему помогаем. Кстати, вот вам доказательство решающего значения учителя: в Верхневилуйске, почти в семистах километрах от Якутска, есть школа-интернат для детей оленеводов. Так вот, из этой скромной школы к нам в университет и в физматшколу ежегодно поступает человек по десять! Мы послали туда наших товарищей узнать, в чем же секрет. И что же? Оказалось, что там волею судеб работают два прекрасных учителя, преподают физику и математику. Это люди, преданные науке, своему призванию. Они-то всю погоду и делают.

— *Как бы Вы, Спартак Тимофеевич, охарактеризовали основные черты ваших выпускников последних лет?*

— В большинстве своем это целеустремленные, серьезные ребята. Превыше всех благ ценят интересную работу, любят науку, очень активны, легко поднимаются на трудные дела. Встала проблема поиска способных ребят — и студенты наши зажглись, включились в дело. Многие работают в ФМШ, другие ездят по городам и селам, проводят олимпиады, третьи читают лекции подшефным сельским ребятам, четвертые проводят у нас здесь воскресные лекции для школьников. Серьезное, уважительное отношение к школе, мне кажется, стало элементом атмосферы нашего университета, его особенностью. Нашим студентам свойствен дух критичности — и это правильно. В науке нельзя полагаться только на авторитеты. Мы дорожим этой атмосферой поиска, спора, становления мировоззрения.

— *Вот какой вопрос: когда наука стала непосредственной производительной силой, с особенной остротой возникла проблема внедрения, использования научных достижений в инженерной практике и технологии. Создаются принципиально новые организации: научно-*

производственные комплексы, при многих академических институтах, как и у вас здесь, в Академгородке, организованы опытные заводы. Внедрение кибернетики, создание автоматизированных систем управления — все это требует новых кадров. Но раньше все было ясно: университеты готовили ученых, втузы — инженеров; теперь, однако, появилась потребность в специалистах нового типа, способных и воспринимать новейшие идеи науки и реализовывать их. В этой связи встает проблема высшей технической школы.

— Аналогичная ситуация уже возникала после войны, когда нужно было срочно создавать атомную промышленность. Понадобились и физики, и химики, и металлурги, и технологи. Они должны были понимать друг друга... Тогда-то по инициативе Игоря Васильевича Курчатова и был создан Физтех — Физико-технический институт (кстати, я окончил его с первым выпуском), а затем МИФИ. Сейчас вновь взрывоподобное развитие науки, возникновение принципиально новых технологий, методов управления, «электронная революция». Опять нужны инженеры высшей категории, люди, способные работать на стыках наук. А как и где их готовить? Я не могу говорить обо всей высшей технической школе, но в тех втузах, которые я знаю, в которых бывал, проверял, качество подготовки инженеров все еще низкое и никак не находится на уровне современных требований. А ведь этим инженерам еще работать лет тридцать — сорок! Мне кажется, в наше время стало абсолютно ясно: чем уже специальность, тем неотвратимее она устаревает. И распределять таких специалистов все труднее и труднее — они уже никому не нужны, а их еще лет десять продолжают выпускать! И чем мельче специализация втуза, тем труднее работать преподавателям общенаучных кафедр, тем слабее теоретическая подготовка студентов. Понимаете, вуз, как всякая организация, стремится к расширенному самовоспроизводству. Растут службы, появляются новые кафедры, факультеты, пухнут штаты, утверждается нездоровый местнический дух («У нас все свои питомцы!»). И в результате и математику, и физику, и химию, и философию со временем преподают собственные выпускники, свои «пирожники». Основательность их знаний заведомо ниже, чем у выпускников университетов, хотя бы потому, что физика — это просто не их специальность, их не учили. Но университетских преподавателей во втузах все меньше и меньше! И все труднее им туда проникать. И вот результат: в одном громадном политехническом втузе (не будем называть!) на кафедре математики всего два (!) кандидата технических наук и ни одного доктора. Теперь, когда нужно готовить специалистов по прикладной математике, автоматизированным системам управления, ЭВМ, технические вузы не в состоянии самостоятельно решить эту государственной важности задачу. В некоторых втузах это уже понимают, начинают идти на контакты с университетами. Вот и мы послали в Хабаровский политехнический институт целую «труппу» математиков, во Владивостоке организовали кафедру прикладной математики, послали туда в 1972 году

двух кандидатов физико-математических наук и двенадцать выпускников.

— *В ходе широкой дискуссии о путях развития высшей школы было высказано немало интересного. В свое время на страницах газет предлагалось ввести двухступенчатое университетское образование. Студенты, проявившие склонность к какой-то области науки, могли бы продолжать образование в том вузе, где это направление наиболее развито. Созданную недавно в Московском инженерно-физическом институте Высшую школу физиков, в которой учатся одаренные студенты из периферийных вузов, можно, видимо, рассматривать как ступень к реализации этой идеи. Но если поиск наиболее эффективной организации научного образования — дело сложное, то с инженерным обстоит едва ли не сложнее. Здесь, пожалуй, не так ярко и быстро выявляются таланты, выбор специальности и профессии часто определяется случаем. Школьник не всегда приходит в вуз с интересом к своей будущей профессии. Он хочет быть инженером, это он знает твердо, а специальность до поры его мало волнует. Социологические исследования показывают, что ведущим мотивом поступления в технический вуз является стремление получить высшее образование, то есть стремление к социальному продвижению, поскольку в обществе большим престижем пользуются профессии, требующие специального образования. Единственное, что абитуриент знает твердо, это то, что он хочет быть инженером. Он хочет получить инженерное образование. Но для планирующих организаций важна именно специальность будущего инженера. Во втузе он ее и получает, а образование — лишь постольку-поскольку. Предлагали ввести двухступенчатую систему, чтобы после первой ступени студент сдавал госэкзамены, получал диплом об общепрофессиональном образовании, а потом поступал бы опять по конкурсу в любой вуз на любую специальность. Двухступенчатую систему обосновывали тем, что она дала бы возможность и отбор студентов производить более тонкий и люди выбирали бы свой путь более осмысленно. Наконец, просто сберегались бы государственные средства: совсем не каждому нужно полное специальное образование — многие уважаемые профессии требуют именно общенаучных и общетехнических знаний.*

— Это хорошая идея, она мне нравится. Раньше она с порога отвергалась, теперь уже обсуждается. Нужно еще основательно подумать, но в принципе это правильная идея. К сожалению, существуют вторичные факторы, которые сильно затрудняют реализацию идеи двухступенчатого образования. Дело в том, что вузы находятся в ведении самых разных министерств. Вот посмотрите, у нас в Новосибирске тринадцать вузов. Только пять из них принадлежат Министерству высшего и среднего специального образования РСФСР. У железнодорожного вуза свои хозяева, у водного свои, у торгового свои. Все вузы стремятся сохранять свои кадры, свои специальности и уж никак не устраивать из них общесоюзный рынок. Вот это и затрудняет возможность серьезных изменений. Простое укрупне-

ние специальностей, которое иногда предлагают, — это паллиатив. В нашей стране в одно время пошли по пути узкой специализации. В результате мы имеем в пять раз больше инженеров, чем в США, но у них значительно больше физиков, математиков, биологов, социологов...

— *Хотя проблема высшей школы сложна и, как вы показали, не решается росчерком пера, не могли бы вы, однако, сделать прогноз основных тенденций развития высшего образования в нашей стране?*

— На недавнем Всесоюзном совещании по проблемам высшей школы, состоявшемся в Кремле, задачи, казавшиеся прежде трудноразрешимыми, обсуждалась квалифицированно и с большой пользой; идеи, прежде почитавшиеся утопическими, воспринимались вполне серьезно и заинтересованно. Это совещание приняло ряд важных положений, которые на ближайший период должны будут определить развитие нашей высшей школы. Усилится значение университетского образования. Программы будут пересмотрены в сторону усиления общетеоретической подготовки, особенно математической. Уже ясно, что узкие специальности будут отмирать, а общенаучные усиливаться за счет выпускников университетов. Ведь сегодня в вузах РСФСР даже среди заведующих кафедрами математики и физики университетское образование имеют двадцать процентов! Что же касается моих субъективных представлений, я думаю, что образование станет «работающим» — студент еще в вузе научится применять полученные знания и, самое главное, самостоятельно добывать знания, недостающие ему. Будут усиливаться и усложняться связи между вузами — за счет обмена преподавателями, стажерами, студентами. Высшая школа должна стать действующей системой с многосторонними связями между вузами — элементами этой системы. Появятся технические университеты с сильными общенаучными кафедрами, широкими научными интересами. Для студентов будет предлагаться большее число факультативов — на выбор; самостоятельность студентов усилится. Центр учебы переместится в библиотеку и лабораторию. Система программированного обучения и электронного контроля текущей успеваемости, возможно, сделает ненужными изнурительные сессии. Использование ЭВМ позволит программировать индивидуальный учебный процесс с учетом способностей и работоспособности студента. Большой объем информации о каждом студенте в памяти машины можно будет использовать (как — это еще надо продумать!) для прогнозирования его будущей деятельности в науке.

— *Для тех, кто сейчас выбирает свой путь в науке, важно знать, как начинали его те, кто прокладывает эти пути. Расскажите, как Вы пришли в науку?*

— Что же здесь рассказывать? Окончил среднюю школу, собирался поступать в университет. Дорога к нему оказалась длинная. Через неделю после выпускного бала началась война. Пошел воевать. Был радистом во фронтовой разведке. Из моего класса вернулись домой немногие. Я вернулся в 46-м в звании младшего лейтенанта. Вот и весь сказ. Пошел учиться. Мы сидели в университетских аудиториях

в гимнастерках и при орденах, прошедшие пекло. Мы уже кое-что знали про жизнь и про смерть и учились как черти. Не знаю, как это выразить... мы учились за всех наших товарищей, не дошедших до университетских стен. Мы поздно начинали, но я не верю, что нужно начинать как можно раньше, торопиться. Дрожать: год-два проморгал, значит, «не успел». Я не верю в ученые утверждения о том, что пик творческой активности человека приходится обязательно на определенный возраст. Это все ерунда! Творческий расцвет зависит от вас самих — и только от вас! Раньше начали — раньше пик, отдача. Позже начали — соответственно дольше сохранится эта активность. Не по возрасту, а по началу настоящей работы надо смотреть. Если это так, если это верно, то просто вредно слишком рано начинать, вредно торопиться: к 40 годам человек уже выдыхается, он внутренне уже пенсионер.

— *Вы не пытались подкрепить вашу гипотезу статистикой?*

— Нет, это трудно! Индивидуальность сильнее, чем систематика, поэтому настоящая социология всегда будет сильнее физики. Личность трудно вычислить. Вам уже трудно понять наше поколение... Мы резко отличались от нынешних студентов. И обстановка в вузе была другая. Первый год я учился на физико-математическом факультете МГУ, а потом Физтех открыли, пошел туда. У всех было огромное желание наверстать пять потерянных лет. Нагнать! С тех пор, помоему, и пошли традиции Физтеха: учись, стисни зубы и учись! Я своим студентам часто говорю: многое я могу простить, но бессмысленную трату времени простить не могу.

— *Увы, до определенного возраста это воспринимается как резонанс, а когда истинную цену времени начинаешь понимать...*

— ... Становится поздно!

— *Читая воспоминания великих ученых, видишь, как много в их научном и человеческом становлении значил Учитель, человек, давший образцы настоящей принципиальности, разъяснивший тебе тебя. К сожалению, современная школа все больше деперсонализируется. Но таланты не вырастают, как в инкубаторе. Кого Вы считаете своим учителем?*

— Это не простой вопрос. Их было много, я не хотел бы, называя одних, забыть о других. Физик-теоретик никогда не вырастает в одиночку. В Физтехе было много замечательных ученых, каждый из них многое передал мне. С первого дня учебы мы работали в институте Курчатова, и Игорь Васильевич внимательно следил за нашими успехами. Для меня он навсегда останется образцом коммуниста и человека. Нас воспитывала сама атмосфера института, а она во многом определялась личностью Курчатова. Огромное влияние оказал на меня Лев Давидович Ландау. Он был человек ироничный, внешне резкий, чуть что не так — мог прогнать и высмеять. Очень хотелось мне сдать ему знаменитый теорминимум. Позвонил ему домой, приходите, говорит. Пришел я, дал он мне задание, ушел в другую комнату. Не заладилось что-то у меня, чуть не прогнал. Пять экзаменов теорминимума я ему сдал...

Значительно позднее, уже сложившимся физиком, я стажировался в Институте теоретической физики Копенгагенского университета у Нильса Бора. Работа там, встречи, беседы, сама атмосфера этого международного центра физиков были для меня очень дороги. Нильс Бор был уже пожилым человеком, но он активно интересовался всем, что происходило в институте, был в курсе всех событий в теоретической физике. Коллектив был интернациональный, собрались крупные ученые из разных стран. Встречи. Семинары. Симпозиумы — вот центр нашего общения. Этот институт практически не имел штатных сотрудников. Бор главенствовал во всех дискуссиях. Своим личным обаянием он привлекал и сплачивал людей. Там я на всю жизнь понял, как, в сущности, невелика наша планета, как интернациональна, доброжелательна настоящая наука.

— *У каждого ученого есть своя «педагогика». А у ректора — и по-давно. Не могли бы Вы сформулировать Ваши педагогические принципы?*

— Мой главный принцип — максимальная самостоятельность всех. А формула... «Развитие самостоятельного мышления через самостоятельную деятельность» — вот так, пожалуй. Создать условия для того, чтобы человек мог раскрыть свои способности. Как, насколько это нам здесь удастся — уже другой вопрос...

— *Спартак Тимофеевич, вы едины в трех лицах: и физик, и педагог, и — не побоимся казенного слова — администратор крупнейшего вуза Сибири. Каковы ваши принципы руководства людьми, научным коллективом?*

— Я думаю, все определяется особенностями нашего университета. Главное наше отличие от всех других вузов, наше богатство и индивидуальность заключаются в том, что не существует университета без Академгородка, без Сибирского отделения Академии наук, без научных институтов. Для них университет создан и благодаря им существует. В этом смысле мы не самостоятельны. Но современный ученый и не вырастает, как в колбе, в старинных университетских стенах. Есть и особенности работы ректора в этих условиях. Я считаю, что моя задача — сделать контакты с институтами оптимальными. Из-за этого, кстати, у нас бывают большие неприятности. К сожалению, стереотип «собственного», «отдельного» очень силен, и его нелегко разрушить. Нас спрашивают: сколько у вас «своих» научных работ? А нам трудно отделить работу университета от академических институтов. Все крупные ученые, работающие в науке на самых передних рубежах, преподают в нашем университете. Все ведущие профессора, включая меня, работают в институтах, имеют отделы, лаборатории, сектора. Наши студенты после третьего курса пропадают в институтах ядерной физики, гидродинамики, геологии, в химических институтах, в Институте экономики. Там студентов учат тому, что нужно сегодня, завтра в охоте за новой истиной. Новые кадры, свежая кровь позарез нужны науке — без них прекратится приток новых идей.

— *Кстати, о «свежей крови»: обмен студентами, аспирантами с другими вузами страны был бы для вас интересен?*

— Да, конечно, и мы все время пытаемся этот обмен наладить. К сожалению, уровень знаний приезжающих к нам «чужих» студентов часто невысок. Мы уже пять лет формируем на математическом факультете группу по прикладной математике из студентов других университетов.

— *Не знаю, согласитесь ли Вы со мной. Современные науки настолько усложнились, развились, что овладеть ими, внести свой вклад можно, лишь полностью посвятив себя науке. Но человек не просто физик или биолог — он еще просто человек среди других людей в мире, который имеет свою историю. Студенты, молодые ученые естественных наук часто жалуются, что им не хватает времени на то, чтобы серьезно познать литературу, живопись, историю, музыку... А тяга к искусству у них огромная. Да и общение с другими людьми не может вестись только на основе профессиональных интересов — это было бы скучно и бесполезно. Как Вы решаете эту проблему «раздвоения»?*

— Когда наши студенты жалуются, что им не хватает времени на искусство, на то, чтобы на концерт сходить, я всегда радуюсь: если человек чувствует себя в чем-то обделенным, уже хорошо, главное достигнуто, он понял, что физика или математика — это еще не все. Если он знает, чего ему не достает, если тянется к искусству — найдутся и время, и книги, и билеты в театр. Я не могу сказать, что обладаю бездной свободного времени, но за литературой успеваю следить. Понимаете, хороших книг не так уж много, как нам иногда кажется. А шедевров и того меньше. Важно ни часа не терять напрасно. Я вот лечу в Москву — беру книгу английскую, и в языке практикуюсь и книгу хорошую узнаю. Музыку старую люблю. Она помогает сосредоточиться и отстраниться от суеты, сбить ритм. Поставлю стереопластинку и слушаю вечерами: Вивальди, Бах, Моцарт. Журналов много выписываю и просматриваю. Атмосфера университета, мне кажется, должна воспитывать широту интересов.

— *Университет — это не просто знания, портреты великих на стенах, студенты и преподаватели. Университет — это атмосфера, славные традиции... Есть ли свои традиции в Вашем молодом университете?*

— Я уже говорил Вам, что атмосфера Науки — это атмосфера университета. Когда в XII веке появились первые «юниверситас», это были объединения преподавателей и студентов. Я считаю, объединение — это главное отличие любого университета. Это — главное в вузе. А еще — хорошие преподаватели. В новом вузе создать творческий, активный коллектив очень трудно. Для нас такой проблемы не было. Коллектив ученых создавали в Академгородке, а значит, и у нас. Одна из главных традиций — демократичность. Ученый любого ранга здесь доступен для студентов. Это особенность университета — все живут и работают рядом. Чванство здесь не проходит. Здесь очень легки контакты. Если студенты кого-то пригласят в свой клуб,

никто не откажется. Не знаю я такого академика. Не было у нас таких случаев. Есть у студентов свои праздники: это такой народ — всегда что-нибудь выдумают. Есть у них перед весенней сессией буйный, озорной праздник — карнавал. Каждый наряжается — кто во что горазд, всякий факультет придумывает свое. Процессия эта проносится через весь городок на площадь перед университетом. Здесь выбирают на год вперед королеву.

— *Красоты?*

— Не только красоты. Она должна предвыборную речь произнести, порадовать остроумием и обещаниями. А кого выбирать — определит специальный прибор «шумометр». Кого громче приветствуют, та и королева. Королева целый год имеет привилегии, которые свято соблюдаются: без очереди обед в столовой, книги в библиотеке, билеты в клубе. Целый год ей королевские почести.

— *А со стороны администрации она привилегии не имеет?*

— Официальных (смеется) нет! Боимся, что иначе переманим из ВГИКа всех красивых девушек. Есть у нас праздники посвящения в студенты, есть свои праздники у физиков, математиков, химиков. Мы ничего не навязываем искусственно. Традиции — они складываются сами. Плохое уходит, оно не может стать традицией.

Через три круга «Системы Физтеха»

С.Т. Беляев. — В кн.: Я — ФИЗТЕХ, Сб. статей, ред. Н.В. Карлов. М.: ЦентрКом, 1996, с. 47–55.

Физтех сегодня знаменит и многогранен. Не только своим опытом и историей, но и мощным влиянием на всю систему высшего образования. Как все задумывалось и начиналось «отцами-основателями», как все развивалось и эволюционировало — дело историков. Думаю, им придется нелегко. «Система Физтеха» — формула почти мистическая, ей многие поклоняются, ею клянутся, но понимают по-своему. Но даже сознавая это, не могу воздержаться в преддверии славного юбилея Физтеха и рискую вложить также свою долю в коллективную разноголосицу. Тем более, что «система Физтеха» пересекла через мою жизнь трижды в разные периоды и в разных направлениях.

Я был среди первого (и последнего) выпуска (1952 г.) физико-технического факультета МГУ, когда он уже превращался в независимый Физико-технический институт. (Ощущение первых студентов — под опытных кроликов созревающей «Системы».)

В течение 13 лет мне пришлось быть ректором Новосибирского университета. Это были годы (1965–1978 гг.) становления и развития. При этом формула и опыт Физтеха (как мы их понимали) были главными ориентирами. (Опыт последователей «Системы» на стороне.)

И, наконец, после моего возвращения в Москву в Институт Курчатова я стал также профессором и заведующим кафедрой в современном «заматеревшем» Физтехе. (Взгляд на приводной механизм «системы» изнутри.)

I. Как я попался в «Систему»

Август-сентябрь 1947 года. Я студент второго курса физфака МГУ. Среди лучших студентов брожение: объявлен прием на первые два курса нового факультета — физико-технического. Поражает необычность: приглашаются как выпускники школ, так и студенты любых курсов других вузов. Все объявленные специальности — самые громкие в то время. В качестве будущих профессоров называют Капицу, Ландау и другие легендарные имена. Я, казалось бы, уже закрепился на физфаке, первый курс окончен на все пятерки. Правда, уходить с физфака пока не требуется, можно отложить окончательное решение, а пока пройти собеседование и подождать результата.

Даже интересно проверить себя. Но когда я нашел себя в списках зачисленных на специальность «строение вещества», сомнений уже не было — твердо решил переходить.

На мое решение в некоторой степени повлияла и атмосфера физфака, которую я успел за год почувствовать. Физфак следовал давним традициям, твердо установленным канонам. Отлаженные курсы, лаборатории. Но послевоенное время своеобразно проявилось. Яркие преподаватели перемежались вышколенными середняками, оригинальные курсы (особенно запомнился курс анализа Игоря Владимировича Арнольда) — добротной рутинной. Для нас, студентов с армейским военным опытом, скоро стала понятна и политическая подоплека. Во время войны многие видные профессора (Хайкин, Ландсберг и другие) из-за эвакуации с академическими институтами вынуждены были оставить преподавательскую работу в МГУ. Их кафедры были заняты, а после войны против них была развернута политическая травля, обвинения в махизме и т.п. Центром и знаменем этой кампании был профессор А.К. Тимирязев.

В качестве иллюстрации: ежегодно на перевыборном партсобрании факультета его выдвигали в партбюро. Импозантный старец выходил на трибуну, долго излагал свою биографию, рассказывал о своей борьбе с махистами за марксистско-ленинскую методологию физики и т.п., а затем брал отвод и под аплодисменты приближенных сходил с трибуны.

Другой «звездой» физфака был молодой профессор-математик Леднев, ниспровергатель теории относительности. Его особо ценили за крестьянское происхождение, которое он явно демонстрировал своим косноязычием.

Запомнилось также бурное разбирательство на партсобрании профессора Конобеевского за его членство в английском Обществе металловедов. Не хотел бы создавать впечатление, что я тогда полностью сознавал серьезность этих эксцессов. Был я тогда, несмотря на военный опыт, политически наивен и рассматривал все это просто как помеху «чистой науке». Надеялся, что на новом факультете приматом будет именно наука.

II. Круг первый

Атмосфера нового факультета разительно отличалась от физфаковской. Все только начинало образовываться, многое репалось спонтанно, на ощупь. Занятия проходили и в Долгопрудном, и в здании университета на Моховой, и в базовых «ящиках». Расписание регулярно менялось, иногда неожиданно вводились новые курсы. Но по степенно стали проясняться основные педагогические принципы, которые старались осуществить «отцы-основатели» физтеха.

Набор фундаментальных курсов и их содержание особенно не планировались. Считалось, по-видимому, что главное — привлечь известных и результативных ученых, а уж они пусть сами решают, что и как читать. Результат: каждый лектор — имя. Содержание курсов, как правило, качественно и умело отобрано. Однако мастерство изложения было самым разным: от довольно бесцветного до просто блестящего (как курс общей физики С.М. Рытова).

К проведению семинарских занятий было привлечено много молодых и талантливых людей, но, как правило, без опыта преподавания. Педагогические приемы нащупывались прямо на занятиях. Со стороны могло казаться, что преподаватели и студенты — один коллектив. Одни учились преподавать, другие учились постигать науку, с энтузиазмом стараясь помогать друг другу. Взаимное доброжелательство и теплота особенно чувствовались в контактах с кафедрой иностранных языков, которая была укомплектована свежими выпускницами вузов. (А на нашем втором курсе многие имели за плечами военные годы или несколько курсов обучения в других вузах.)

Эта часть учебного плана была все же почти традиционной. За исключением, пожалуй, необычных форм заданий, зачетов и экзаменов (с элементами конкурса, соревнования). Аудитории были полны, несмотря на либеральное отношение деканата к посещению занятий. Управлять всем этим хаотическим процессом мог только выдающийся человек. Им явно был Борис Осипович Солоноуц (или, как было общепринято, БОС), хотя и не формальный, а действующий декан. Он был центром всего, все знал и решал. Для первых студентов Физтеха БОС был главным наставником, к нему обращались по всем вопросам и всегда получали помощь. (Через много лет мои контакты с ним возобновились и продолжались до его кончины. Но об этом ниже.)

Наиболее принципиальное значение при задумывании Физтеха явно придавалось как можно более раннему совмещению фундаментального образования с работой в базовых исследовательских организациях (в нашем случае — сплошь «ящиках»), причем работой серьезной и ответственной (хотя сначала, может быть, просто лаборантской). По-видимому, от этого нововведения много ждали и на него серьезно рассчитывали. Бросалось в глаза, что к чтению спецкурсов, к руководству лабораторной практикой привлекались ведущие сотрудники, причем активно занятые в ответственных работах. Педагогическое мастерство и здесь явно не было главным критерием отбора, но это с лихвой компенсировалось пользой от непосредственных контактов с активно работающими профессионалами. Нельзя сказать, что все мы тогда понимали серьезность этой части учебного процесса. После тяжелого пресса лекций и семинаров практика казалась нам почти отдыхом. Наша группа в Курчатовском институте (тогда «Лаборатории-2») даже старалась инициировать дополнительные занятия.

Новизна обстановки, частые контакты с известными и важными людьми, которые проявляли явный интерес к происходящему, и

не терпеливое ожидание конечного результата нашего «выращивания» — в результате всего этого мы опущали себя подопытными кроликами в каком-то очень важном процессе. (Теперь-то мы знаем, что проводилось стендовое испытание, генеральная репетиция «системы Физтеха».)

III. Круг второй, внешний

В феврале 1962 года (уже защитив докторскую диссертацию) я впервые приехал в Новосибирский академгородок по приглашению А.М. Будкера, директора организованного там Института ядерной физики (ИЯФ). (Он был моим дипломным руководителем в Курчатовском институте, а затем в течение нескольких лет мы работали вместе.) Обстановка в академгородке меня настолько поразила, что в мае того же года я вместе с семьей переехал в академгородок и стал заведовать в ИЯФ теоретической лабораторией.

Строительство академгородка было в разгаре, и основные идеи развития в общих чертах определены. Ядро каждого института образовывали «десанты» из основных научных центров (Москва, Ленинград и др.), каждый из которых, наряду с известными учеными, состоял из научной молодежи, аспирантов, выпускников и даже студентов. Но рассчитывать и в дальнейшем на этот источник исследовательских кадров было наивно, поэтому сразу же было задумано создание местного университета. «Система Физтеха» не только идеально подходила для университета в составе научного центра, но была единственно возможной. Для создания традиционной университетской структуры и коллектива требовалось большое время, да и создавать его было бы логичнее в миллионном Новосибирске.

Михаил Алексеевич Лаврентьев, глава Сибирского отделения Академии наук и его Новосибирского научного центра, сам был среди организаторов Физтеха. Среди первых новоселов академгородка было немало преподававших на Физтехе, а выпускники Физтеха были очень заметны не только числом, но и научной активностью, организаторской хваткой. Поэтому идейных противоречий при создании университета не возникало. Но от общей идеи еще очень далеко до практического единодействия. Опыт Новосибирского университета, где «система Физтеха» развивалась в наиболее чистом виде, без необходимости существенных компромиссов под давлением извне, заслуживает детального анализа. Несколько замечаний, навеянных личным опытом.

Первым ректором НГУ (1959–1964 гг.) был Илья Несторович Векуа. После его отъезда в Грузию, где вскоре он был выбран Президентом Академии наук, вопрос о новом ректоре надолго затянулся. Я был далек от этого, пока не стали «выкручивать руки» мне.

Мне казалось это несерьезным. После окончания Физтеха я по совместительству 10 лет преподавал в МИФИ. Там, работая на кафедре Леонтовича вместе с Померанчуком, Компанейцем, Левичем и другими опытными профессорами, я получил кое-какой опыт. Продолжил преподавание в НГУ. Но стать ректором? Я долго сопротивлялся. Тем не менее после многих бесед с уважаемыми людьми меня дожали. В значительной мере сдвиг произошел благодаря беседам с академиком В.В.Воеводским, явным лидером химико-биологического направления в научном центре. Он был в НГУ деканом факультета естественных наук, считая его более важным, ключевым, чем пост директора НИИ. Всемирно известный самобытный ученый и яркий человек, он горел идеей внедрить физтеховскую систему в подготовку химиков и биологов. Последние сомнения из меня выбил Александр Данилович Александров. Я пытался понять задачи и ответственность ректорской должности, выпытывая его опыт ректорства в ЛГУ. Любитель парадоксальных высказываний, он выдал мне: «Ваше главное преимущество как раз в том, что Вы никогда не занимали никаких административных постов». Я понимал это так: «никаких готовых рецептов ждать не следует, на до самим думать и решать».

Потом я понял, что на практике эта формула, к сожалению, требует дополнения — «всячески преодолевая внешние препятствия». Не хочу здесь углубляться в трясину внешних обстоятельств (министерство, обком и т.д.) и их преодоления. Хочу лишь отдать дань глубокого уважения и благодарности за поучительные беседы и многочисленные практические советы Борису Осиповичу Солоноуцу, легендарному физтеховскому БОСу. Лаврентьев, зная о его явно не ординарной роли в практическом воплощении идей Физтеха, пригласил БОСа в Новосибирск для аналогичной роли в НГУ. К сожалению, он пробыл там недолго, не найдя, по-видимому, взаимопонимания с Векуа. (Этот момент БОС никогда не затрагивал в наших беседах, но зная обоих, не могу представить рядом сановное достоинство одного и кипучую энергию и инициативность другого.) Почти каждый раз, оказываясь в Москве, я приходил в его маленькую уютную квартиру в старом деревянном московском доме, и мы долго за чаем обсуждали дела на Физтехе и в НГУ.

В идеале ситуация в Академгородке казалась предельно ясной. Исследовательские институты (их число постепенно перевалило за 20) и университет образуют единое целое. Набор факультетов, специальностей, структура курсов, учебные планы — определяются и увязываются с тематикой и задачами НИИ. Основной преподавательский состав — совместители из НИИ. Студенческая практика, специальные курсы переносятся непосредственно в институты. Дипломные работы — часть плановых работ институтов. Основное распределение — в академические НИИ.

Эту сухую схему можно еще и раскрасить. Скажем, с физическим факультетом взаимодействуют 5–6 НИИ. В своей непосредственной работе они редко взаимодействуют между собой, но теперь вынуждены взаимодействовать на факультете, конкурируя при определении

учебного плана и содержания курсов, за преподавательскую нагрузку и студентов-практикантов. Защита дипломов на общем Совете является и смотром научных достижений каждого НИИ, и внимания, уделяемого подготовке студентов. При неактуальной тематике и невысоком качестве диплома лаборатория и НИИ понижают свой рейтинг при распределении студентов на практику. Таким образом, университет фактически играет роль объединяющего и координирующего центра всего академгородка. Причем, не по какому-то приказу, а в силу общей заинтересованности. Институтам нужны молодые, хорошо подготовленные и проверенные сотрудники — поэтому есть желание работать со студентами. Университету нужны хорошие, инициативные преподаватели и хорошо организованная исследовательская практика. Компактное расположение университета и НИИ в одном городке (аналог кампуса крупного университета США) дает возможность гибкого маневра с расписанием, позволяет студентам проводить любое дополнительное время в исследовательских лабораториях.

Реальность, как всегда, была далека от идиллии. По многим вопросам не было единства внутри научного сообщества. Даже при общем согласии с формулой системы Физтеха, предполагающей для выпускника: серьезный научный фундамент (общенаучную ориентацию), практические навыки профессионального исследователя, стремление и умение постоянно самообучаться, — на практике возникают расхождения при определении веса каждой составляющей и, как следствие, перетягивание и раздувание учебного времени. Расширить и углубить каждый из компонентов — процесс вполне объективный, и не просто осознать, что улучшение частей приводит к ухудшению целого.

В НГУ многое удалось, особенно на физическом факультете, хотя и другие факультеты (в первую очередь факультет естественных наук с химией и биологией) смогли сформулировать и реализовать «систему Физтеха», адекватную своим научным направлениям.

Перечислю лишь основное, что удалось осуществить на физфаке НГУ.

Ограничить обучение пятью годами; начиная со второго курса, увеличивающееся время практики в НИИ. Все обязательные общие курсы оканчиваются в середине четвертого курса; минимум общих курсов, исключить все не самое необходимое (например, курс химии). Убрать повторы. Так, был только один курс физики (вернее, два параллельных курса условно макро- и микро-физики) без разделения на общую и теоретическую. Просто «общая» часть согласованно продолжалась «теоретической».

Но отложим подробное обсуждение опыта НГУ до его юбилея. Здесь хотелось бы только подчеркнуть, что «система Физтеха» доказала свою жизнеспособность и продуктивность не только на самом Физтехе. Да к тому же не хотелось, чтобы «система Физтеха» превратилась в нечто застывшее и неизменное. Ведь сам Физтех отнюдь не оставался неизменным, а скорее, постоянно эволюционировал.

IV. Круг третий, с сединою

Лично я убедился в этом при моем новом «обручении» с Физтехом с начала восьмидесятых годов. Мало что напоминало романтический хаос моих студенческих лет. Кое-что проглядывалось от старого Физтеха, но многое изменилось разительно. (Правда, как и вся жизнь за это время.) Некоторые важные позиции, которые, хотя и с трудом, но удавалось отстаивать в НГУ, здесь стали жертвой обстоятельств. (Не обрастать собственной экспериментальной базой и научными коллективами, что чревато потерей гибкости в выборе направлений подготовки; не наращивать процент штатных преподавателей — теряется свобода ликвидации одних курсов и введениях других; изменять специализации не путем расширения приема и открытия новых кафедр, а заменяя одни кафедры на другие.) Все эволюционные изменения можно понять и оправдать. Общий закон возрастания энтропии можно сдерживать лишь затратой энергии. А ее источники не всегда имеются. К тому же, гибкость и приспособляемость к ситуации, по существу, также является неотъемлемой чертой «системы Физтеха». Не изменяясь, нельзя сохранять передовые позиции в меняющемся мире. Правда, раньше приходилось в основном следовать за изменениями в научной сфере, а теперь резко меняется общая обстановка в стране. Сможет ли Физтех сохранить свои ведущие позиции в новой рыночной ситуации, не жертвуя основными принципами и целями? Где его новое место и какова его роль в сегодняшней и завтрашней России?

Сегодня явно сузилась потребность в научных кадрах, но существенно расширяются области, требующие, по существу, научного подхода: ориентировки в нестандартных ситуациях, использование строгих аналитических методов, самостоятельного переобучения, творческой инициативы. Развитие этих навыков фактически и дает физтеховское образование. К тому же немало выпускников Физтеха успели уже ярко проявить себя за традиционными рамками науки. Будем надеяться, что Физтех достойно ответит и на этот вызов нового времени.

К 100-летию Нильса Бора

The lessons of Niels Bohr

S.T. Belyaev. The lessons of Niels Bohr. — Impact of Science on Society, 1985, No. 137, p. 39–49.

"One thing that has remained", says a Soviet scientist of his contacts and conversations with Niels Bohr during a year's sojourn in Copenhagen in the 1950s, "is a clear and unmistakable admiration for the man". Warm and human, yet with profound insights into the theory of atomic structure, Bohr is remembered as a great scientist who not only made fundamental contributions to man's understanding of the nature of matter, but who also played a unique role as mentor, helper, friend and critic to many young scientists.

For decades the Institute for Theoretical Physics in Copenhagen was the physicists' Mecca. The feelings of two young Soviet physicists, a colleague and myself, who arrived in 1957 to spend a year at the Institute can therefore be easily understood. By that time, the Cold War had become a thing of the past, the First Geneva Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy had already taken place and I.V. Kurchatov's communication at a meeting in Harwell had opened up an era of international co-operation on the problems of thermonuclear synthesis. And here we were, the first post-war visiting Soviet scientists to arrive in Copenhagen.

The Niels Bohr Institute was founded in 1920. Although it has expanded steadily since then and experimental physicists are now working there along with theoretical physicists, it continues to function in much the same way as it always did, with a very small permanent staff. The Institute's personnel consists mainly of visiting scientists from various countries who spend a year or two there. They include both famous scholars and young people with talent. When people are invited in a personal capacity, their particular scientific interests are usually taken into account.

One is made to feel part of the Institute immediately upon arrival, when the newcomer is given the keys to the door of the Institute and of the laboratory where he will be working. Everything here is conducive to intensive scientific contact. Every week, a number of guest scientists from the leading laboratories of the world come to hold seminars on the new work they are engaged in, and, in the intervals between seminars, debates and discussions go on ceaselessly in the laboratories. In addition to the seminars, series of lectures are given regularly and are attended by students from the university as well. At midday, everybody traditionally

gathers for lunch in a big dining hall with large communal tables. There they devour packets of home-made Danish sandwiches, outstanding for their variety, and drink milk or coffee from the buffet. Here, too, there are lively debates and discussions, with people jotting down notes on paper napkins; but the conversations are by no means confined to physics. Although the group is made up of people of many nationalities, language problems quickly vanish as everyone rapidly learns "broken" English. Psychological or ethnic communication difficulties likewise vanish, thanks to the periodic gatherings at the homes of our Copenhagen hosts and the generally cheerful and festive atmosphere inside the Institute.

A democratic climate and concern for people

The special way in which the seminars are conducted is an indication of the work-style of the Institute itself. During my stay, controversial and even erroneous views would be put forward, but criticism was mild, the participants endeavouring to make the speaker see the flaws or errors in his presentation. Occasionally the discussion would continue after the seminar in a smaller circle until disagreements were resolved. What was particularly striking was the democratic climate that prevailed, the absence of barriers between the older scientists and those embarking on a scientific career, and the unobtrusive concern for every guest, not only as regards his work but also his leisure and his adaptation to Copenhagen life. A great deal of thought apparently went even into the assignment of guests to the various laboratories. All this made for a creative atmosphere, fostered scientific contacts and provided an incentive to effective work.

At the time, I gave no particular thought to the work-style of the Institute, but I now understand that it was in fact Niels Bohr who established a creative and stimulating atmosphere around him.

He was himself unable at that period to devote much time to new problems in physics. He was busy preparing a collection of his papers, was working in the Danish Academy of Sciences and on the Danish Atomic Commission and was involved in the establishment of the atomic centre with its reactor and accelerator at Riso — all of which made considerable demands on his time. But the life of the Institute — his brain-child — was dearer to him than anything else. Bohr made a special effort not to miss interesting seminars and lectures, took part in discussions, and was always full of concern for the Institute's guests, inviting them regularly to his home. He lived in a large detached house, the property of the Carlsberg Foundation, lifetime use of which is granted to the most honoured citizen of Denmark. The house is in the classical style with moulded ceilings, bas-reliefs, sculptures by Thorvaldsen and a conservatory, not very much in keeping with the simple and boisterous, and not at all prim and proper, receptions given there by Bohr.

In those of us who had come from the USSR, Bohr showed particular interest. I remember several long and dispassionate conversations that we had with him in the Institute and at his home. He asked us many

questions about his Russian colleagues and friends—Kapitsa, Tamm, Fok and, particularly, Landau. His face was always lit up by a warm smile and he recalled with enthusiasm the excitement of Landau's stay in Copenhagen, his eccentric pranks and his quick and ready wit.

The launching of the first artificial satellite (shortly before our arrival) noticeably sharpened the Institute's interest in Soviet science. Bohr, too, took a lively interest in the state of science in our country and was curious to learn about its structure and organization. In that connection, his recollections about his trips to the Soviet Union and his inquiries about the people he knew there helped him to put the things we told him into a more meaningful perspective.

Bohr's special role in quantum physics development

Probably because Bohr was then busy preparing his papers for publication, he often spoke about the exciting days which saw the emergence of quantum mechanics. He recalled his discussions with Einstein and his arguments with Pauli, Heisenberg and other members of the Copenhagen circle. He conveyed the feeling that the history of quantum physics was his life and had permeated his being, not in the form of dry scientific facts but through the medium of human beings, in the mutual exchange of ideas, arguments and points of divergence and convergence. Quantum physics grew out of the work of this circle. Bohr, however, played a special role in its development, a much more substantial role than can be judged from an enumeration of his published works. From what Bohr himself said emerged a picture of a wise mentor and thinker who worked among a group of very gifted, by no means simple, prickly, unruly and "untamed geniuses", the developers of quantum physics. His was the task of making clear to each of them the positions held by the others, of sustaining each in his own convictions and of sharpening his arguments in critical discussions.

It was a pleasure working in the Institute and we lost ourselves in our work, and although more than a quarter of a century has passed since then, I still feel a deep debt of gratitude to the Institute and have a particular affection for it. All this is possibly explained by the fact that my contacts and conversations with Niels Bohr were marked by simplicity and ease, without any hint of discrimination. I have only a hazy recollection of them today, but one thing that has remained is a clear and unmistakable admiration for the man.

I subsequently met Niels Bohr in Moscow at the time of his last visit to the Soviet Union in 1961. We met at the Kurchatov Institute, where I was then working, at Kapitsa's seminar at the Institute of Physical Problems, at Moscow University and at a reception at the Danish Embassy. I recall a number of details of these meetings. Some of the things he said have stuck in my mind and never cease to provide food for thought. When reading memoirs or listening to people who knew Bohr well, I always used to try and compare what I read or heard with my own image of Bohr, with my own perceptions and understanding of the man. Thus,

for more than twenty-five years now, there has been no slackening of my interest in this truly great man, his work, ideas, thoughts and methods. It was not an image simply drawn from history; it was something more important and intimate.

All this has led to and strengthened my conviction that Bohr has great significance even today, and that many of his ideas have relevance to the problems of our time, not only in physics but in other sciences, too, and not only scientific problems but human problems as well. There is much that we today can learn from the life and activities of Niels Bohr.

Simplicity, clarity and logical thought

Quite recently I came across a review of a theoretical article in a leading physics journal. I was struck by what the reviewer had intended as a devastating remark: "The article does not contain even one formula". To be sure, theoretical physics has become extremely mathematical and could even be called mathematical physics. The use of a complex mathematical apparatus is now almost a matter of prestige, and authors often take pleasure in showing off their knowledge of the new branches of mathematics and their skill in applying mathematical ideas and constructions that were unknown in physics only a little while ago. This craze has spread to other sciences as well. There would be no reason to object to this natural trend if such formulae heightened and shed further light on the physical representation of a phenomenon or of a particular "fragment" of reality and did not, on the contrary, obscure it. Bohr's works from that standpoint are unique. One finds in them simple mathematics, a clear-cut statement of the problem and the utmost clarity and logic of thought. His basic work on the nuclear capture of neutrons, in which he put forward the fundamentally new concept of a compound nucleus, did not contain a single formula. Reading *The Passage of Atomic Particles through Matter* one experiences aesthetic delight at the enlightened simplicity of his presentation.

Quantum mechanics was developed in two major scientific centres — Gottingen and Copenhagen. Gottingen came under the powerful influence of the great mathematician Hilbert who is remembered for his half-jesting but significant remark that "Physics is too complex for physicists". He seriously posed the problem of translating the theories of physics into precise mathematical language. Max Born, the head of the Gottingen "quantum centre", who had been through the Hilbert school, never tired of repeating that "mathematics is cleverer than we are". It is not surprising that the Gottingen school played a prominent role in creating the new and unique mathematical apparatus of quantum mechanics. All the same, the unique quality of this apparatus was no more than a reflection of the specific laws governing the realm of quantum mechanics, to elicit which required the enlightened intuition about physics possessed by Bohr.

"Supreme melodiousness in the realm of thought"

Planck's discovery of a new constant — "the quantum of action" — ushered in a new age in physics, but the initial explanations of various phenomena as yet provided no reliable pointers for further advances. Bohr's work *On the Structure of Atoms and Molecules* (1913) was a turning-point. This is how Einstein described the development of quantum theory in the pre-war years in his *Autobiographical Sketches*:

All my efforts...had failed completely. It was exactly as if the earth had slipped from under my feet and nowhere was any firm ground to be seen on which anything could be built. I always felt it was a miracle that this shaky and contradiction-ridden foundation was enough to enable Bohr, a man with brilliant intuitiveness and a fine flair, to discover the basic laws of the spectral lines and electron shells of atoms, explaining their importance for chemistry. I still consider it a miracle today. It is supreme melodiousness in the realm of thought.

In 1922, Bohr gave "Seven Lectures on the Theory of Atomic Structure" in Gottingen. They contained nothing that was particularly new, but his audience was struck by the style of his reasoning. Oskar Klein, who accompanied Bohr, had this to say:

From behind every one of his carefully formulated statements there emerged a long chain of underlying ideas... You could immediately feel that his findings were less the result of calculations and proofs than of his insights into the subject and intuitive conjectures. And it was not easy for him to find justification for these findings in the face of the rigidity of the Gottingen school of mathematics.

But Bohr captured the imagination of two young members of the Gottingen school, Heisenberg and Pauli, and invited them to work for a time in Copenhagen.

Bohr and his Copenhagen Institute became the centre for the discussion and interpretation of the principles and methodological aspects of quantum mechanics and for the elucidation of its underlying physical laws and the principles of interpreting its mathematical language.

Temporary crisis and stormy discussions

The development of quantum mechanics abounded in temporary crises and perplexities. Stormy discussions and debates would give it fresh impetus and indicate new directions of research. Thus Heisenberg, shortly after his return to Gottingen from Copenhagen in the spring of 1925, elucidated the idea of the "matrix" formalism of quantum mechanics. Practically at the same time, Schrodinger proposed his wave equation and then proved the equivalence of the two approaches. However, with the discovery of the basic equations, the establishment of quantum mechanics was still not complete. The content of such basic concepts

as causality, determinism, the completeness of the description of reality and the specific nature of the processes for measuring atomic objects had all to be reinterpreted. The elucidation of these questions, the creation of a harmonious and consistent logical system for the interpretation of quantum mechanics, the clarification of methodological and philosophical questions and of the conceptual apparatus of quantum physics — all this is the main scientific achievement of Niels Bohr. Quantum mechanics represents a fusion of the mathematical apparatus with the principles of its physical interpretation, without which it would not exist as a scientific theory.

The importance of an intuitive approach to physics and the need to perceive the physical essence of phenomena behind the complexity of mathematical form — this is the lesson to be drawn from Bohr's life-work, a lesson that is particularly relevant to science today.

Bohr and Einstein: how their work-styles differed

In the history of twentieth-century physics the names of Niels Bohr and Albert Einstein are often placed side by side, and not only because their discussions played an enormous role in elucidating the principles of quantum mechanics. Niels Bohr often drew a parallel between the gnoseological problems of quantum physics and the theory of relativity. The theme of "Einstein and Bohr" is a vast and many-faceted field and a large number of special studies and monographs have been devoted to it. I should like to point out here the differences rather than the similarities in the working methods of these two scientific giants. If one had to find one word to describe Einstein's style of work, one could call it "hermit-like". Einstein preferred quiet solitude and profound concentration. It is difficult to name anyone who studied under him directly or to speak of an Einstein school in the literal sense of that term. On the other hand, Niels Bohr was for many years the focal point, the point of convergence of young talent. One cannot say enough about his role as mentor and helper, friend and critic, especially when it is remembered that the interpretation of quantum mechanics grew out of long discussions and exhausting controversies.

Bohr used to expend great effort in order to clarify the reasoning of young scientists and to persuade them, whenever necessary, to carry their research further. Typical in this respect were the long and arduous discussions he had with Heisenberg in 1927 concerning Heisenberg's famous work on the uncertainty principle. Bohr was gentle and considerate by nature but he became adamant and uncompromising whenever questions of principle were involved. He felt that Heisenberg's work was not sufficiently well thought out and showed shortcomings and flaws in its reasoning, but Heisenberg rejected the criticism, citing Pauli's favourable opinion. Heisenberg, the younger of the two, suffered a mental crisis, relationships were broken off and contact ceased. Bohr had always had the greatest admiration for Heisenberg's abilities and

he was disheartened by Heisenberg's superficial analysis of the problem. However, truth triumphed in the end. Subsequently Heisenberg recalled:

several days later we agreed that the article could be published if revisions were made in a number of places, and I have to confess that they improved the text considerably. At the end [of the article] I added a note saying I had discussed my work with Bohr and that, as a result of these discussions, substantial changes has been made in the text.

The "secret" of Bohr's success with the young

For many years there were regular "family gatherings" in Copenhagen at which the world's leading young theoreticians spoke of the new work they were doing and held heated discussions about it. In May 1961, following Bohr's lecture at P.L. Kapitsa's seminar, a free and easy discussion took place. In response to Landau's question about the secret of attracting so much young talent, Bohr replied: "There was no secret. I simply wasn't afraid to appear stupid in front of young people". It was, of course, a joke, but it was very revealing. His contacts with his young students were without any hint of arrogance. He had a very tolerant attitude towards their sometimes noisy extravagances and often joined in with the general merry-making. This is very well illustrated by the three manuscript volumes of "Jocular Physics" put out by his students and friends to mark his fiftieth, sixtieth and seventieth birthdays. The tone of subtle irony that coloured Bohr's answer to Landau's question typified the man's attitude towards himself. Incidentally, in interpreting Bohr's replies into Russian, E.M. Lifshitz at first made a mistake. The reply became: "I simply was never afraid to tell them that they were idiots". Those in the auditorium at once noticed the mistake and burst out laughing because such a reply could very well have fitted Landau who was quick-tempered by nature, was extremely demanding towards his many students and had set a high standard of "correctness" for assessing theoretical work.

An intelligent, attentive, fatherly attitude towards young scientists, and the ability to guide, initiate and stimulate their successes while not stifling them with his authority and, it goes without saying, not considering his help as conferring a right to co-authorship — here is yet another of the lessons taught us by Niels Bohr.

The importance of open-ended discussion

A unique place in twentieth-century physics is occupied by the discussions that took place over many years between Bohr and Einstein. They were unique both in the significance and extent of the problems covered and in the psychological tension and dramatic nature of the situation. Bohr himself often spoke about the tremendous role played by these discussions in clarifying and developing the basic principles

of quantum mechanics. In the article he contributed in 1949 to the *Festschrift* in honour of Einstein, Bohr wrote that

to a volume in which contemporary researchers are honouring Albert Einstein for his enormous contribution to the natural sciences and are expressing the gratitude of our whole generation for the way paved by his genius... I doubt whether I can make any better contribution than to describe these debates which, although they did not result in complete agreement, were extremely valuable and stimulating for me.

And Bohr noted further "how useful was the open exchange of ideas for moving forward in a field where the new results from time to time required us to revise our views".

Einstein himself made a great contribution to the development of quantum physics with his theory of the photoelectric effect (1905) and his theory of light radiation and absorption (1917). He could not, however, reconcile himself to the specific statistical character of the description of phenomena in quantum mechanics because he regarded such a description as incomplete. "It is so contrary to my scientific flair that I am compelled to search for a more complete system of concepts", he wrote later. To demonstrate the incompleteness of quantum mechanics' description of phenomena, Einstein suggested a number of different "imaginary experiments" in which he tried to provide a more detailed description of a phenomenon than that offered by quantum mechanics.

The Bohr-Einstein rivalry

Bohr found inaccuracies in Einstein's statement of the problem of factors that Einstein had failed to take into account, and continued to resolve in favour of quantum mechanics whatever paradoxes appeared. Einstein persisted in his views and his still more elegant and refined experiments steered the discussion towards yet more fundamental gnoseological questions. There were periods which, as Bohr put it, took on a "highly dramatic character". That was especially true of the public discussions held at the Solvay Congresses in 1927 and 1930 where the majority of the world's elite physicists clearly sided with Einstein and his views and Bohr had only a few hours to come up with an answer to Einstein's next puzzle. Bohr enjoyed recalling the details of this "heroic" period. I remember his emotional account, in Moscow in 1961, when, with much gesticulation and excitement, he described the duel and its surprises, attempting to convey his emotion to his audience.

The discussions between Bohr and Einstein are instructive in many respects. For all their passion and intransigence, they were carried on in a spirit of great magnanimity and deep mutual respect. The exultation of a victory or the bitterness of a defeat were only outward manifestations that took second place to scientific truth.

"Quantum mechanics can never be understood" — Landau

Until the end of his life, Einstein could not reconcile himself to the principles of quantum mechanics and hoped for and searched for a "more detailed" and complete description of micro-objects. Unfortunately, even geniuses often refuse to accept, or have difficulty in coming to terms with, new ideas, especially if that entails a sweeping re-examination of their views, as was the case with quantum mechanics. Even today it is hard for students to master and get used to quantum mechanics. I remember what Lev Landau told his students: "Quantum mechanics can never be «understood», you simply have to get used to it". That was a very profound observation because to "understand" means to reduce to something that is already known. It was easier to get used to and come to terms with quantum mechanics in an atmosphere of unending discussion, debate and controversy such as there was in Copenhagen. The enclosed world of Einstein was not conducive to that.

When, in 1927, Pauli accepted a chair in Zurich, he wrote to Kronig inviting him to join him as his assistant because he apparently felt that he, Pauli, would miss the furious debates of Copenhagen. 'Your duties will be light,' Pauli wrote. 'Every time I say something, it will be your job to contradict me, mustering all the facts to do so.'

How important it is to have a worthy opponent when you are seeking, clarifying and refining the truth. And Bohr could hardly have dreamed of a wiser, more persistent and honest and, at the same time, gentle and considerate opponent than Einstein.

Bohr's ability to change his views with dignity

Permit me to digress for a moment. It is not uncommon for work of major importance to escape the notice of contemporaries, the stature of the scientist and the significance of his discovery being recognized only by succeeding generations. We have often observed as well that the authors of outstanding discoveries are found to have had forerunners, sometimes contemporary or quite recent, and that this gives rise to arguments over primacy. Occasionally this is the result of carelessness or coincidence, but more often the original discoverer either simply failed to recognize the importance of his discovery or was reluctant (or not daring enough) to try to convince the specialists of its significance. In this case, too, the example of Bohr is highly instructive. His first work on the theory of atomic spectra (1913) was fundamentally at odds with classical electromagnetic theory. It took a great deal of scientific courage, not to say impudence, on his part not only to decide to publish his work but also actively and loudly to elucidate its meaning. Bohr was also the first to note the weaknesses of his theory and, in just the same way, spoke about them at the top of his voice, so to speak. Subsequently, the principles of quantum mechanics were established by means of an all-out offensive, with Niels Bohr invariably playing an active and leading part. Such a way of working was fraught with possibilities of error. Errors can

be found in Bohr (for example, his 1924 statement about the possible non-conservation of energy in atomic processes), but under the pressure of facts he could openly and with dignity change his point of view. Bohr gave a wonderful example of the boldness and impartiality of scientific thought and of an honest active fight for the recognition of new ideas.

Changing the way we view the world

In science, Bohr was concerned by problems of the utmost complexity that demanded fundamentally new approaches and went to the roots of the view of the world provided by physics, touching upon gnoseological and philosophical problems. The principle of correspondence and particularly the principle of complementarity, a "complementary method of description", propounded by Bohr as a means of solving the specific problems of quantum physics, represented an important contribution to the theory of knowledge. The principle of correspondence was formulated by Bohr in order to "save" his atomic model (1913) which had broken with customary classical physics but did not yet possess the solid foundation of quantum mechanics. On the other hand, is it possible to break completely with classical physics? There is, after all, a broad class of phenomena that it correctly describes. Is there a bridge between two different descriptions — the classical and the quantum? The correspondence principle established such a bridge, since the radiation of an electron in "high" quantum atomic orbits comes increasingly close to radiation of the classical type.

That principle has today acquired a more general gnoseological significance, establishing a dialectic of changing relations between "old" and "new" scientific theories. Each new, more general theory does not fully discard the old but must incorporate it as a somewhat special case and shift to the old theory where the latter applies. In such a general formulation, the correspondence principle is of great heuristic importance not only for physics.

Of still greater importance is the principle of complementarity, whose general relevance, breadth of application and philosophical interpretation are still the subject of controversy today. The principle was formulated definitively in 1927.

A full, exhaustive description of quantum phenomena is possible only through recourse to two, mutually exclusive ("complementary") sets of classical concepts. Thus, for example, Heisenberg's uncertainty principle is a special case of the complementarity principle expressed mathematically. Bohr repeatedly went back to justifying, explaining and refining his principle, stressing that the complementary method of description has arisen because our ("classical") language was inadequate to describe a fundamentally different ("quantum") reality. The principle of complementarity has also played a very important role elsewhere than in the interpretation of quantum mechanics. "We have also learned something about the theory of knowledge and what we have learned also has a bearing on problems far outside the realm of physics", Bohr

wrote, focusing his attention primarily on biology and psychology. His views on that question never fully crystallized. For many years Bohr, apparently, repeatedly returned to the philosophical significance of the principle of complementarity and its potential role outside physics. Some evidence remains (of varying reliability) of statements he made about his discovery of complementary scales for describing reality in various spheres of human experience.

Truth and clarity

Once after a lecture in a student auditorium Bohr was asked to suggest a term complementary to the word "truth", and he answered "clarity". Many years have passed since then but I am still stuck by the profundity of that assertion. Indeed, "lie" is not the complement of "truth"; it is merely another graduation on one and the same scale. The proper complementary term is, indeed, "clarity", a pure concept that is applicable to any phenomenon and that knows no exceptions. "Truth" is a set of different reliable facts which may even contradict each other and do not necessarily fit into a "clear" overall picture. Our whole understanding of objective reality and thinking are gradations on these scales: the collection and assimilation of different facts and then their "marshalling" into a harmonious, clear concept. If new facts do not fit into the general concept, they are often ignored or perceived with mistrust. These two complementary modes of perceiving reality are clearly present in our thinking. There are also people with a markedly expressed preference either for "truth" (critics, analysts) or for "clarity" (traditionalists). I do not know if this is what Bohr had in mind but for me this is a graphic illustration of how the complementary method of description has enriched our thinking. Throughout his life, Bohr did not confine himself to the specific problems of his own science but also explored gnoseological and philosophical theories of knowledge, and he provides us with an example worthy of emulation.

Bohr and the problems of war and peace

On this, the hundredth anniversary of the birth of Niels Bohr, something must be said about his role in solving the problems facing the whole of mankind, and particularly about his position in relation to war and peace. Bohr often found himself facing difficult choices. Let me cite a few examples.

In 1938, he made a speech at the International Congress on Anthropology and Ethnology on "The Philosophy of Natural Science and the Cultures of Peoples", in which he spoke about the beneficial "complementarity" of different human cultures and about the "national sense of self-satisfaction characteristic of any human culture that has withdrawn into itself". The members of the German delegation ostentatiously left the meeting.

In 1943, he fled from occupied Denmark to Sweden and afterwards flew to England in the bomb-bay of a military aircraft. He took part in

the "atomic project" which led to the development of the atomic bomb, but immediately after the war he severed all connection with this work.

In 1944, risking his personal position, he tried unsuccessfully to persuade Roosevelt and Churchill of the need for concluding an international agreement on the control of atomic weapons. In a special memorandum to Roosevelt, Bohr stressed the importance of maintaining the unity of the Allies achieved during the war and, with this purpose in mind, the need to impose immediately after the war a ban on the military application of atomic energy and to make atomic energy available to all countries for peaceful uses.

In 1950, in an open letter to the United Nations, Bohr urged the creation of a world where peaceful development would be ensured and co-operation among all countries would become a reality. He called upon "all advocates of international co-operation — individuals and whole nations — to exert their efforts" to attain this objective. Although Bohr himself admitted that his appeal smacked of utopia, he was convinced that mankind has no alternative but to transform that utopia into reality. In 1955, Bohr put forward the same ideas in his opening speech at the First International Conference of the Peaceful Uses of Atomic Energy in Geneva.

His paramount concern

During this period, Bohr realized that the search for ways of averting nuclear war and bringing about international co-operation had become the paramount concern of his life. Whenever we met while I was working in Copenhagen, Bohr would continually turn to these questions of worldwide importance and he made an effort to "get a feeling for" the conditions of life in our country and our reaction to his proposals. His questions were often very specific and he was concerned about the opinions of people whom he knew personally. This is why Bohr viewed such abstract notions as "people", "country" or "nation" in the light of his own personal experience of life and his personal relations with real people.

At this time, Bohr was at the height of his fame and, after the King, was unquestionably the best known man in Denmark. The time had long since passed when Niels Bohr, like all his colleagues, came to the Institute by bicycle. He now arrived in a big black limousine (an extreme rarity in the bicycle-riding Copenhagen of those days) driven by a uniformed chauffeur. Nevertheless, he still remained his old self, a man full of charm and consideration, simple and shy. Often, after arriving at the Institute in this smart car, he could be seen crossing the street to buy sandwiches for lunch in a little shop. His rather corpulent figure seemed to be bent over as if he felt as a physical burden the weight of the problems of the world which he had selflessly determined to carry on his own shoulders, and that he had now suddenly understood the weakness and frailty of one lone person. But Niels Bohr understood that he could not do otherwise.

Нильс Бор и физика атомного ядра

С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Нильс Бор и физика атомного ядра. — Успехи физических наук, 1985, т. 147, вып. 2, с. 210–251.

ВВЕДЕНИЕ

«Здесь для физики открывается совершенно новое поле деятельности: исследование внутреннего строения атомных ядер».

Н. Бор^[1]

Будущий историк науки, вероятно, отметит, что в течение почти всей первой половины XX века наиболее фундаментальным объектом, сконцентрировавшим научные интересы ведущих физиков и крупнейших физических лабораторий, было атомное ядро. Из находящегося где-то внутри атома источника загадочных α - и β -лучей оно материализовалось в сосредоточивший почти всю атомную массу центр атомной «планетной» системы, а затем, дав физикам разглядеть свои внутренние составляющие — протоны и нейтроны, превратилось, опять изменив свой облик, в жидкую каплю, дробление которой выделяет огромную энергию, несущую благотворное тепло и в то же время угрозу существованию человечества.

Во второй половине столетия физики, вооружившись небывало изощренными и дорогостоящими экспериментальными установками гигантских размеров, смогли разглядеть детали внутренней структуры самих внутриядерных частиц, перейдя на более глубокий — кварковый — уровень. Изучение структуры ядра ушло с переднего фронта как бы в арьергард исследований. В некоторых институтах, по традиции сохраняющих в своих названиях слово «ядро» или его производные, собственно ядерной физики практически уже нет.

И тем не менее физика ядра развивалась и в это время, вероятно, более интенсивно, чем раньше. Шло дальнейшее накопление и уточнение спектроскопической информации, синтез новых изотопов, измерение тонких поляризационных и корреляционных эффектов, продвижение в область высоких энергий возбуждения и переданных импульсов, больших спинов, малых времен жизни, ядер, далеких от области стабильности. Совершенствовался теоретический аппарат, приспособляющийся к специфике ядра, как уникальной ферми-системы с сильным взаимодействием, мощные методы квантовой теории поля и статистической физики. Открывались и совершенно новые фундаментальные явления. Напомним (далеко не исчерпывающим образом) лишь некоторые достижения в исследовании ядер, начиная с конца 50-х годов.

Условно можно говорить о макроскопических и микроскопических аспектах современной физики ядра. К первым отнесем те явле-

ния, которым можно сопоставить прямые аналоги в физике конденсированных сред: накладывающие отпечаток на все ядерные свойства парные корреляции нуклонов сверхпроводящего типа; двугорбые барьеры деления и делительные изомеры формы; семейство новых звукоподобных коллективных мод (гигантские мультипольные резонансы и изобарические аналоговые состояния); глубоко-неупругие столкновения тяжелых ионов, дающие временную развертку процессов установления равновесия в системе с конечным числом степеней свободы (ядерная кинетика); быстро вращающиеся ядра с фазовыми переходами к несверхпроводящему и сверхдеформированному состояниям. Наиболее важные микроскопические аспекты — те, для которых ядро является природной лабораторией по установлению свойств фундаментальных взаимодействий. Так, в частности, были проверены варианты слабых взаимодействий, открыты несохранение четности, продольная поляризация нейтрино; наиболее удивительным было обнаружение несохранения четности в делении, усиленного ядерными механизмами уже до степени почти классического макроскопического движения. По новому ставится теперь школьный вопрос: «Из чего состоят ядра?». Кроме основной при низких энергиях нуклонной компоненты волновой функции ядра эксперименты дают информацию о других компонентах: кластерной, мезонной, изобарной, странной, очарованной и, наконец, кварковой³. При релятивистских энергиях возникает новая макроскопическая ядерная физика, связанная уже со сверхплотной ядерной материей, сверхсильными электрическими полями и кварк-глюонной плазмой.

Уже этот беглый перечень демонстрирует богатство физических явлений, заложенных природой в атомное ядро. Нильс Бор любил повторять шекспировскую мысль: «Все мы являемся свидетелями и участниками великой картины бытия». В течение полувека он был свидетелем становления квантовой физики атомов, ядер и элементарных частиц и ее активнейшим творцом. Не только фундамент нового — квантовофизического — мировоззрения был заложен Бором. Он первым понял и объяснил такие — сейчас тривиальные — факты (заряд ядра совпадает с номером химического элемента в периодической таблице, а ядро делится как жидкая капля), которые, кажется, всегда были всем известны. И он же выдвинул глубочайшие физиче-

³Современная постановка этого вопроса, по существу, восходит к Н. Бору. После выяснения нереальности протонно-электронной модели ядра он предвосхитил фермиевскую теорию β -распада, придя к выводу, что «испускание β -лучей из ядра может рассматриваться как создание электрона как некой механической единицы»^[3]. Позднее он неоднократно подчеркивал вероятностный характер всей проблемы^[4]. Интересно, что тем не менее Бор считал возможным сказать: « α -частицы могут рассматриваться в значительной степени как отдельные, реально существующие образования, входящие в состав ядер»^[3]. Современные данные действительно указывают на заметный вес в волновой функции ядра сильных α -частичных корреляций нуклонов. Эти же четверные корреляции, возможно, существенны при проявлении кварковых эффектов в ядрах^[178].

ские идеи, влияние которых на дальнейшее развитие физики вообще и физики атомных ядер в частности еще далеко не исчерпано.

Открытие Э. Резерфордом существования атомных ядер и происходящих при их распаде превращений химических элементов расценивалось Н. Бором как достижение, знаменующее «новую эпоху в физических и химических науках»^[2] или, еще шире, «в истории естествознания»^[1].

Ниже мы выборочно (руководствуясь собственными научными интересами) проиллюстрируем судьбу некоторых идей Нильса Бора в физике ядра. Не претендуя на воспроизведение хронологии и полноту библиографии, в ряде случаев мы предпочтем сослаться на обзорные работы. К работам Н. Бора даются добавочные ссылки на том переводов: Бор Н. Избранные научные труды. Т. II. Статьи 1925–1961 гг. — М.: Наука, 1971. — (Сер. «Классики науки»).

1. ОТ КОМПАУНД-ЯДРА К ЯДЕРНОЙ КИНЕТИКЕ

«Он [Н. Бор] опасался, что формальная математическая структура скроет физическую сущность проблемы, и был убежден, что законченное физическое объяснение должно, безусловно, предшествовать математической формулировке».

В. Гейзенберг (^[179], с. 10)

1.1. Почему узки нейтронные резонансы?

В небольшой заметке «Захват нейтрона и строение ядра»^[5] Н. Бор выдвинул концепцию, оказавшую сильное, или, как пишут Ф. Фридман и В. Вайскопф в обзорной статье^[6], решающее влияние на все дальнейшее развитие физики ядра и вообще многочастичных квантовых систем. Исходя из факта открытия узких нейтронных резонансов, где сечения реакций велики по сравнению с ядерными размерами⁴, Бор предположил, что существуют квазистационарные возбужденные состояния ядер с большими временами жизни τ , на порядки превышающими времена $\tau_{s.p.} \sim 10^{-21}$ с, отвечающие чисто одночастичному движению медленного нейтрона через сложное ядро.

Физические свойства этого промежуточного состояния («компанунд-ядро», или составное ядро) определяются по Бору сильным взаимодействием, быстро распределяющим энергию возбуждения между частицами. Обсуждая более детально физику составного ядра в фундаментальной работе «О превращениях атомных ядер, вызванных столкновениями с материальными частицами»^[8], ее авторы (Н. Бор

и Ф. Калькар) писали: «Всякое превращение атомного ядра проходит через промежуточный этап, в котором энергия временно оказывается распределенной между всеми частицами составной системы». В лекциях и выступлениях Бор неоднократно иллюстрировал эту гипотезу простым примером запутывания влетевшего бильярдного шарика в неглубокой тарелке, наполненной такими же шарами. При наличии трения о дно тарелки вполне вероятно, что процесс закончится без выбивания шаров (аналог радиационного снятия возбуждения). Другая возможность состоит в том, что в результате многочастичных столкновений один из шаров перекатится через край наружу.

Таким образом, речь идет о вылете частиц или γ -квантов из составного ядра как о результате «флуктуации» с достаточной концентрацией энергии на одной частице. Точнее, следует говорить не об индивидуальных частицах, а о степенях свободы системы, так как выходным каналом реакции может быть, например, и вылет кластеров, не имеющих соответствия в модели твердых шариков. Н. Бор подчеркивал, что существенной чертой таких реакций является свободная конкуренция всех возможных (т.е. совместимых со строгими законами сохранения) процессов распада или излучения.

В этой картине, которая, очевидным образом, не ограничена нейтронными реакциями, а включает и реакции, индуцированные заряженными частицами, γ -квантами или тяжелыми ионами, возникает «разделение ядерных реакций на отдельные стадии с такой отчетливостью, какая не имеет аналогии в механическом поведении атомов»^[5]. Первая стадия отвечает созданию составного ядра с в некотором входном канале a , в то время как вторая — распад составного ядра в канал b — не зависит от первой, определяясь лишь относительными вероятностями концентрации энергии на разных степенях свободы. Автономность стадий реакции равнозначна отсутствию зависимости распада составного ядра от способа его образования. Математическим выражением такой концепции может служить формула Брейта–Вигнера^[9], полученная независимо от теории Бора для сечения реакции $a \rightarrow c \rightarrow b$, идущей через изолированный резонанс промежуточной системы:

$$\sigma_{ba} = \frac{\pi}{k^2} \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_c)^2 + \Gamma^2/4}, \quad (1)$$

здесь k — импульс относительного движения во входном канале, E — полная энергия системы, E_c — энергия резонанса в составном ядре, Γ_a и Γ_b — парциальные ширины в соответствующих каналах, Γ — полная ширина, определяющая время жизни составного ядра. Изолированность резонанса, отвечающего квазистационарному состоянию c , имеет место, если его ширина Γ мала по сравнению со средним

энергетическим расстоянием $D = \frac{1}{\rho} (\rho(E_c) - \text{плотность уровней})$ между состояниями составного ядра с данным угловым моментом J

⁴Вся история этого этапа ядерной физики подробно изложена в ^[7].

и четностью P . Неравенство $\Gamma \ll D$ выполнено в области нейтронных резонансов и вплоть до энергий возбуждения ~ 10 МэВ.

Формальное описание с помощью дисперсионной формулы (1) дает удобную параметризацию резонансной компоненты энергетической зависимости сечений, но ничего не говорит о природе резонансного состояния, о том, как устроена его волновая функция в терминах нуклонных переменных. По Бору, волновая функция промежуточного состояния имеет очень сложный характер. При энергиях возбуждения ядра, превышающих несколько МэВ, плотность уровней становится столь большой, что описание в терминах каких-то простых мод (например, движения независимых частиц) перестает быть адекватным.

Из-за «быстрого увеличения возможностей комбинации собственных частот»^[5] простых движений, происходящего с ростом энергии возбуждения, расстояние между уровнями оказывается малым по сравнению с характерными энергиями взаимодействия, смешивающего эти простые моды. В результате истинные волновые функции стационарных (или квазистационарных при учете возможности вылета частиц наружу) состояний Ψ_c содержат огромное число простых компонент φ_i :

$$\Psi_c = \sum_i A_i^{(c)} \varphi_i. \quad (2)$$

В силу нормировки состояния Ψ_c типичные величины вкладов $|A_i^{(c)}|$ простых возбуждений малы,

$$|A_i^{(c)}| \sim \frac{1}{\sqrt{N_c}}, \quad (3)$$

где $N_c \gg 1$ — число компонент φ_i , дающих заметный вклад в Ψ_c . И наоборот, простые состояния φ_i столь же сложно представляются в базисе Ψ_c истинных ядерных состояний. Если разложение φ_i покрывает характерный интервал энергий Γ_{\downarrow} (так называемая спредовая

ширина или область фрагментации), то $N_c \sim \frac{\Gamma_{\downarrow}}{D} \gg 1$. Можно ожидать, что фазы коэффициентов суперпозиции (2) или обратного разложения хаотичны. Тогда в наблюдаемые вероятности процессов подавляющий вклад будут давать когерентные комбинации квадратов модулей $|A_i^{(c)}|^2$, где малость каждого из них компенсируется числом слагаемых.

1.2. Статистическая модель

Подобные рассуждения естественным образом приводят от точной постановки квантовой задачи многих тел к статистической формулировке. В области изолированных резонансов каждый из них может трактоваться как представитель ансамбля состояний составного

ядра. Хаотичность фаз влечет за собой вымирание недиагональных матричных элементов статистического оператора (матрицы плотности). Входной канал в реакции, ведущей к образованию составного ядра, играет роль начальных условий; само же составное ядро со свойствами, не зависящими от способа его образования, отвечает термодинамическому равновесию. Средние характеристики ансамбля резонансов должны быть близки к результатам временного усреднения свойств типичного состояния ансамбля (эргодичность).

Теперь можно перейти на стандартный статистический язык. Логарифм плотности уровней ядра дает энтропию $S(E)$; производная

$$\partial S / \partial E = \frac{1}{T}$$

определяет температуру T , $\partial E / \partial T$ отвечает теплоемкости и т.д. Конечно, число степеней свободы ядра не столь велико, как в макроскопических системах. Поэтому некоторые величины, пренебрежимо малые в термодинамическом пределе больших систем, могут давать заметные поправки в ядрах, так что в ряде случаев статистические вычисления для ядер должны делаться с более высокой точностью. Тем не менее, пока энергия возбуждения составного ядра мала по сравнению с полной энергией связи, вполне можно «уподобить многие свойства ядерной материи свойствам обычных твердых или жидких веществ»^[8].

В этом «термодинамическом» приближении плотность уровней $\rho(E) \sim \exp S(E)$, но для установления функции $S(E)$ и предэкспоненты необходимы более детальные модели. Достаточно хорошее представление о плотности уровней ядра можно извлечь из простейшей модели ферми-газа^[9], для которой $S(E) = 2\sqrt{\alpha E}$ (где α — константа, пропорциональная плотности одночастичных уровней у поверхности Ферми).

Альтернативную версию статистического подхода можно получить, как предполагал Н. Бор, комбинируя многоквантовые состояния колебательных мод, в возбуждении которых, подобно фоновым состояниям упругой среды, принимают участие многие частицы ядра. Бор заметил, что в математическом смысле задача сводится к определению числа способов $\rho(n)$ представления большого числа n суммой положительных целых чисел (формула Харди-Рамануджана⁵):

$$\rho(n) \simeq (4\sqrt{3}n)^{-1} \exp\left(\pi\sqrt{\frac{2n}{3}}\right).$$

Основная зависимость $\rho(n)$ в модели колебательных мод и ферми-газе оказывается одинаковой. Зависимость же E от температуры T может существенно отличаться, так как функция $E(T)$ определяется

⁵Любопытно, что эта задача была решена еще Л. Эйлером в 1753 г. (см. в [155]).

законами дисперсии тех элементарных возбуждений, газом которых моделируется система.

Концепция составного ядра, интерпретированная в статистических терминах, позволяет сделать огромное число конкретных предсказаний, касающихся сечений разнообразных ядерных реакций⁶. В первую очередь следует здесь назвать теорию распада составного ядра как испарения частиц^[9–12]. Принцип детального равновесия связывает вероятность испускания частицы (или кластера) возбужденным ядром с сечением обратного процесса захвата. Обратный процесс зависит от плотности уровней ядра, являющегося остаточным в прямом процессе испарения. Энергетическое распределение $w(E)$ испускаемых нейтральных частиц похоже на максвелловское и определяется в основном контригрой двух факторов: экспоненциально-го $\simeq e^{-\frac{E}{T}}$, возникающего от роста многочастичной плотности уровней остаточного ядра, из-за которого выгодна меньшая концентрация энергии на испущенной частице, и степенного, обусловленного увеличением с энергией E доступного вылетающей частице одночастичного фазового объема. Для заряженных частиц существенно еще энергетическая зависимость проницаемости кулоновского барьера. Н. Бор подчеркивал, что в ядре, в отличие от макроскопической системы, при испарении частицы может возникнуть существенное изменение тепловой энергии, так что температура, определяющая спектр испаряемых частиц, есть именно температура остаточного ядра.

1.3. Оптическая модель

В первых работах и выступлениях Н. Бора, посвященных физике компаунд-ядра, эта идея формулировалась в несколько более категорической форме, чем это обычно бывало в боровских работах, выдвигавших принципиально новые физические представления. Мы уже цитировали статью (с. 101) Бора и Калькара, где говорится о необходимости промежуточного состояния для всех ядерных реакций. Исторически это легко объяснимо. Незадолго перед этим усилиями большого числа независимых экспериментаторов была выяснена непригодность простой картины чисто потенциального рассеяния медленного нейтрона на ядре. Наличие резкой зависимости от энергии со средним расстоянием между резонансами $D \simeq 10^{-(5\div 6)} D_{s.p.}$,

где $D_{s.p.} \sim \frac{\hbar v}{R} \sim \frac{\hbar}{\tau_{s.p.}}$ — расстояние (~ 1 МэВ) между одночастичными резонансами при рассеянии частицы на внешней потенциальной яме, v — скорость внутри ямы, требовало для своего понимания но-

вых идей. Картина промежуточного ядра естественно объясняет как существование резонансов, так и большое сечение захвата нейтронов (при малых энергиях возбуждения вероятность радиационного девозбуждения долго живущего компаунд-ядра велика, $\Gamma_\gamma > \Gamma_n$).

Ситуация существенно усложняется по мере роста энергии возбуждения. Расстояние между уровнями падает, а полная ширина каждого из них растет из-за быстрого увеличения числа открытых каналов неупругих реакций. Таким образом, возникает обратное соотношение параметров $\Gamma \gg D$. Такая ситуация обсуждалась в более поздней работе Н. Бора, Р. Пайерлса и Г. Плачека^[13]. Поскольку отдельные резонансы промежуточного ядра теперь перекрываются и четкая резонансная структура пропадает, результат конкретного эксперимента будет зависеть от детальных фазовых соотношений между компонентами той суперпозиции перекрытых состояний, которая реально возбуждается. Тогда основное предположение статистической теории — отсутствие корреляции между формированием и распадом промежуточной системы — может нарушаться. Авторы приводят простой пример, когда возникает пространственная структура состояния, целиком связанная со входным каналом и предпочитающая определенный путь распада: «Если быстрая частица сталкивается с системой сравнительно больших размеров, энергия возбуждения может оказаться локализованной в небольшой окрестности точки соударения и вылет быстрых частиц из этой окрестности может быть более вероятным, чем в случае статистического равновесия». Эксперимент во многих случаях демонстрирует наличие «прямых» процессов, не проходящих через составное ядро, а также процессов промежуточных типов.

Необходимые условия применимости чисто статистического подхода можно сформулировать на временном языке^[14]. Среднему расстоянию D между уровнями отвечает период биений $\tau_r \sim \hbar/D$, который можно трактовать как квантовый аналог времени возврата в квазипериодическом классическом движении. Именно за такое время достигается эргодическая равновесность населенностей отдельных ячеек фазового пространства, лежащих на поверхности с заданными значениями точных интегралов движения. Для $\Gamma \ll D$ типичное время жизни составного ядра $\tau \sim \hbar/\Gamma$ велико по сравнению с τ_r , т.е. за время жизни происходит реальное усреднение по фазовому пространству, что соответствует статистическому равновесию.

В области перекрывающихся уровней $\tau < \tau_r$, и полное равновесие не успевает установиться. Тем не менее предположение о независимости распада составного ядра от способа его образования все еще может быть справедливым. Для этого достаточным может оказаться разнесение во времени процессов создания и распада составного ядра, т.е. условие, чтобы время жизни τ превышало, по крайней мере, время Δt взаимодействия падающего волнового пакета с ядром. При условии $\min(\tau, \tau_r) \gg \Delta t$ отсутствует интерференция волны, отраженной в потенциальном рассеянии, с волнами частиц в распадных каналах (характерное время их появления τ) или с волной, упруго

⁶Под влиянием боровской идеи о промежуточном состоянии, быстро релаксирующем к равновесию и последующему термодинамическому распаду, сформировалась теория множественных процессов при высоких энергиях.

рассеянной через составное ядро (она возникает через период возврата τ_r).

Можно ожидать поэтому, что независимость входного и выходного каналов реализуется, если неопределенность энергии $\Delta E \sim \hbar/\Delta t$, связанная с длительностью Δt падающего пучка, будет превышать величины $\Gamma \sim \hbar/\tau$ и $D \sim \hbar/\tau_r$. Тогда процессы, идущие через составное ядро, будут некогерентными с процессами прямого взаимодействия. Величина ΔE может быть введена искусственно путем усреднения экспериментальных сечений по небольшому (по сравнению с интервалом энергий, где сильно меняются средние величины сечений) интервалу, включающему много уровней составного ядра. Такое усредненное описание отвечает оптической модели ядерных реакций^[15,16], где рассеяние частицы описывается с помощью эмпирического комплексного потенциала, мнимая часть которого глобально описывает поглощение падающей волны, т.е. те процессы, которые из-за образования промежуточного ядра оказываются некогерентными с входным каналом (совокупность этих процессов шире, чем использованное ранее понятие составного ядра, ибо здесь не предполагается установления полного равновесия).

Оптическая модель остается до сих пор почти единственным инструментом описания ядерных реакций в широкой области энергий. В духе боровского принципа дополнительности отказ от детального рассмотрения резко меняющегося энергетического хода сечений выявляет другую — по существу одночастичную — сторону процесса взаимодействия частицы с ядром. Усредненные сечения отражают не статистические, а чисто динамические (динамика средних величин) аспекты рассеяния на комплексной потенциальной яме. При этом восстанавливаются известные из элементарной квантовой механики характерные энергетические зависимости с типичными значениями энергетических интервалов $\Delta E \gg D$, одночастичные резонансы, связанные с размерами ямы, переход к дифракционному рассеянию ($\sigma_{\text{tot}} \rightarrow 2\pi(R + \lambda)^2$) с ростом энергии и т. д.

1.4. Статистическая спектроскопия. Случайно ли распределение уровней компаунд-ядра?

Большой интерес представляют не только средние «оптико-модельные» величины, но и флуктуационные отклонения от них. В области изолированных резонансов ($\Gamma \ll D$) речь идет о статистике ядерных уровней и соответствующих волновых функций^[17,18], проявляющихся через квадраты модуля некоторых своих компонент (нейтронные и радиационные ширины). Если, согласно концепции составного ядра, волновые функции истинных стационарных или квазистационарных состояний имеют в простом (например, оболочечном) базисе очень сложную структуру, состоящую из миллиона некогерентных компонент (2), то, как уже говорилось, можно изучать статистические свойства этого ансамбля уровней. Это быстро развивающееся

направление теоретического исследования и вычислительного моделирования называют «статистической спектроскопией», охватывающей, кроме ядер, спектры атомов, молекул и модельных квантовых систем.

Статистическая спектроскопия началась именно с изучения нейтронных резонансов, где можно выделить последовательности десятков и сотен уровней с заданными значениями интегралов движения J^P . Статистические свойства достаточно больших кусков таких спектров оказываются в различных ядрах подобными между собой. С хорошей точностью распределения $w(\varepsilon)$ расстояний ε между последовательными уровнями в спектре со средним расстоянием D даются функцией Вигнера^[19]

$$w(\varepsilon) = \frac{\pi}{2} \frac{\varepsilon}{D^2} e^{-\frac{\pi\varepsilon^2}{4D^2}}. \quad (4)$$

Обращение $w(\varepsilon)$ в нуль выражает факт «отталкивания» уровней одинаковой симметрии, впервые обсуждавшийся в^[20] и обнаруженный в анализе реальных спектров в^[21]. Распределение (4) совпадает с распределением Рэлея для длин двумерных векторов, компоненты которых являются независимыми гауссовыми случайными переменными. Обращение длины вектора в нуль требует одновременного исчезновения обеих его компонент, что возможно лишь в одной точке плоскости (множество меры нуль).

В терминах матричных элементов гамильтониана H для двух-уровневой системы квадрат ε^2 расстояния между собственными значениями равен

$$\varepsilon^2 = (H_{11} - H_{22})^2 + 4|H_{12}|^2. \quad (5)$$

В системе с инвариантностью относительно отражения времени фазы базисных состояний можно выбрать так, что недиагональные матричные элементы H_{12} и $H_{21} = H_{12}^*$ эрмитова гамильтониана H будут вещественными, и, следовательно, равными между собой, $H_{12} = H_{21}$. Если оставшиеся переменные $\xi = H_{12}$ и $\eta = (H_{11} - H_{22})/2$ считать случайными нормально распределенными величинами, то мы придем к распределению Рэлея–Вигнера (4) для величины ε . Таким образом, формула (4) выражает фактически определенные свойства случайного гамильтониана (некоррелированность и гауссовость матричных элементов, эрмитовость и T -инвариантность). В некотором смысле это означает дальнейший шаг на пути к предельно статистическому описанию системы — усреднение не только по макросостояниям, но и по самим неизвестным гамильтонианам, которые управляют точной микроскопической динамикой, но при очень густой сетке уровней проявляют лишь некоторые общие свои характеристики.

Задание глобальных свойств симметрии, инвариантных по отношению к преобразованиям базиса, определяет «канонические» ансамбли случайных матриц^[22], играющие в смысле минимальности вложенной информации такую же роль, как ансамбли Гиббса в обыч-

ной статистической механике. Так, для T -инвариантных систем возникает гауссов ортогональный ансамбль, в простейшем (двумерном) случае дающий распределение (4). Для больших отрезков спектра функция распределения собственных значений^[22] имеет вид экспоненты $e^{-\text{const} \cdot \text{Tr}(H^2)}$, умноженной на полином, обращающийся в нуль при совпадении любой пары собственных значений; распределение расстояний соседних уровней при этом очень близко к результату (4) для двумерных матриц, так что их отличие находится пока за пределами погрешностей обработки экспериментальных данных.

Если T -инвариантность гамильтониана нарушена, то недиагональные матричные элементы $\xi = H_{12} = H_{21}^*$ комплексны, так что в равенстве (5) обращение ε в нуль требует равенства нулю трех случайных переменных ($\eta, \text{Re}\xi, \text{Im}\xi$). Такие случайные матрицы описываются гауссовым унитарным ансамблем, для которого имеется более сильное отталкивание уровней, $w(\varepsilon) \sim \varepsilon^2$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Здесь возникает исключительная ситуация, когда можно пытаться по такому сугубо статистическому эффекту, как усредненная по ансамблю корреляция положения близких уровней, искать ответ на вопрос о наличии в ядерной динамике компоненты, нарушающей одну из фундаментальных симметрий природы, — обратимость времени. На имеющемся экспериментальном материале ядерных уровней достоверных указаний на отсутствие T -инвариантности не найдено.

Функция Вигнера (4) хорошо описывает распределение ближайших расстояний между уровнями как для нейтронных, так и для протонных резонансов в тех случаях, когда с достаточной степенью надежности отбираются состояния составного ядра с определенными квантовыми числами J^P . Аналогичными свойствами обладают типичные атомные спектры (хотя здесь качество сравнения хуже) и спектры, найденные в диагонализации оболочечного гамильтониана с остаточными силами.

В некотором смысле противоположным является распределение Пуассона

$$w(\varepsilon) = \frac{1}{D} e^{-\frac{\varepsilon}{D}}, \quad (6)$$

где плотность вероятности обнаружения соседнего уровня на малых расстояниях есть константа $w(0) = 1/D$, и максимум в спектре приходится как раз на малые расстояния⁷. Здесь уровни в энергетической шкале создают случайную последовательность событий, подобную распределению актов радиоактивного распада во времени. Можно проследить, что при наложении^[18] друг на друга вигнеровских последовательностей уровней для разных J^P полное распределение приближается к пуассоновскому, так как вращательная инвариантность гамильтониана и сохранение четности строго запрещают матричные элементы H_{12} между членами разных последовательностей.

⁷Впервые пуассоновское распределение расстояний между уровнями тяжелых ядер было использовано в работе И.И. Гуревича^[23].

Аналогичные результаты можно получить и из анализа даже первых возбужденных состояний ядер, т.е. при рассмотрении «поперечного» к шкале энергий сечения ансамбля уровней разных ядер (еще одно проявление эргодических свойств). Здесь, однако, распределения типа Вигнера для фиксированных значений J^P и типа Пуассона для уровней с разными значениями точных интегралов движения возникают лишь после исключения систематических коллективных эффектов, регуляризующих свойства низколежащих состояний.

Глубокие физические причины, определяющие результирующий характер спектра, по-видимому, еще не до конца раскрыты. Только начинает выясняться взаимосвязь этих явлений с интенсивно изучаемым динамическим хаосом^[24,25], который может возникать в классических системах даже при очень малом числе степеней свободы, проявляясь как эргодическое поведение траекторий в определенных областях фазового пространства и их неустойчивость по отношению к малой вариации начальных условий. В последние годы все больше появляется примеров стохастического движения в простых квантовых системах, где квантовые соотношения неопределенности и связанное с ними расплывание волновых пакетов могут изменить характер эволюции при больших временах^[26].

Первоначальная стадия теоретического изучения и численного моделирования дала аргументы в пользу разделения (по крайней мере, в квазиклассическом пределе) квантовых систем на «регулярные» и «нерегулярные» в зависимости от того, характеризуется ли их классический аналог квазипериодическим или эргодическим поведением. К регулярным, в частности, относятся интегрируемые системы с более чем одной степенью свободы. В соответствующих квантовых системах расстояния между уровнями не коррелированы и распределение должно быть пуассоновским (6). В отличие от этого системы, хаотические в классическом пределе, проявляют отталкивание уровней и близкую к вигнеровской (4) функцию распределения расстояний. Простым примером может служить «бильярд Синая» (см. ^[27]) — соответствующая квантовая задача в ^[28] рассмотрена на примере решения свободного уравнения Шрёдингера в плоской треугольной области, из которой вырезан маленький участок. Начиная с некоторой энергии, уменьшающейся с ростом величины искажения области, спектр собственных значений может быть описан гауссовым ортогональным ансамблем с характерной «жесткостью» (малые и однородные по спектру флуктуации распределения уровней). Низколежащая же часть спектра хранит память об исходной треугольной симметрии с присущим ей вырождением и может быть вычислена (при малом искажении формы) по теории возмущений.

Именно такая ситуация выглядит правдоподобной моделью ядерных спектров. Оболочечная структура низколежащих состояний возникает^[29] как квантовый аналог квазипериодических траекторий волновых пакетов в поле определенной симметрии. Конфигурации нуклонов, принадлежащие одной оболочке, отвечают^[30] в основном существенно разным пространственно-спиновым структурам, в то

время как главные части остаточного взаимодействия имеют правила отбора, предпочитающие связывать в далеко отстоящие по энергии состояния. В этой области «регулярных» волновых функций достаточно большие массивы уровней будут почти пуассоновскими. В области же «нерегулярных» волновых функций основную роль играют недиагональные (в оболочечном базисе) матричные элементы взаимодействия, создающие, в согласии с первоначальной картиной Бора, стационарные состояния с близкой пространственно-спиновой структурой. Каждое из этих состояний покрывает фактически всю классически доступную часть фазового пространства при данной энергии, и при переходе к квазиклассике возникает (после крупнозернистого огрубления) равновероятное заселение фазовых ячеек, т. е. микроканонический равновесный ансамбль. В модельных квантовых задачах с хаотическим классическим аналогом удастся прямо проследить^[30] переход квантовой функции распределения в фазовом пространстве (которая тоже носит имя Вигнера^[31]) в классическое микроканоническое распределение при $\hbar \rightarrow 0$. В квантовом случае здесь следует ожидать распределения уровней, близкого к вignerовскому (4).

Ансамбль случайных матриц определяет статистические свойства не только собственных значений, но и собственных векторов (2). Наблюдение реализации отдельного канала i распада составного ядра с осуществляет анализ этих сложных суперпозиций, фиксируя квадрат модуля $|A_i^{(c)}|^2$ компоненты, связанной с этим каналом. В гауссовом ортогональном ансамбле амплитуды $A_i^{(c)}$ в пределе $N_c \gg 1$ описываются нормальным распределением с нулевым средним значением и с дисперсией (3)

$$\overline{|A_i^{(c)}|^2} = 1/N_c.$$

Если открыт лишь один канал i , то парциальная ширина распада Γ_i совпадает с полной шириной Γ компаунд-ядра и, поскольку $\Gamma_i \sim |A_i^{(c)}|^2$, для распределения ширин получится распределение Портера–Томаса^[32]:

$$w_1(\Gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{\Gamma}\Gamma}} e^{-\frac{\Gamma}{2\bar{\Gamma}}}. \quad (7)$$

В ситуации, когда регистрируется несколько каналов, распады в которые нескоррелированы, аналогичные рассуждения дают для полной ширины $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$ χ -квадрат-распределение с числом ν степеней свободы, равным числу каналов:

$$w_\nu(\Gamma) \sim \Gamma^{(\nu/2)-1} e^{-\frac{\nu\Gamma}{2\bar{\Gamma}}}. \quad (8)$$

Дисперсия этого распределения (флуктуации ширин) позволяет извлечь число открытых каналов

$$\nu = \frac{2\bar{\Gamma}^2}{\overline{\Gamma^2} - \bar{\Gamma}^2}. \quad (9)$$

Для барьерных реакций с резкой зависимостью ширин от энергий последняя формула определяет некое эффективное число каналов^[18]. Важная информация, полученная таким способом в многочисленных экспериментах, относится к каналам деления (гл. 3).

Чрезвычайно интересным и обещающим направлением дальнейших исследований остается поиск статистических характеристик, несущих сведения о реальном ядерном гамилтониане и отличиях от предельной картины случайных матриц^[18,25,33].

1.5. Ядерная кинетика

В ряде случаев высокая плотность компаунд-уровней является источником так называемого динамического усиления эффектов, играющих в обычных условиях роль малых поправок^[34]. Так происходит, в частности, со смешиванием ядерных уровней противоположной четности при учете слабого взаимодействия^[35–37]. Если слабые взаимодействия нуклонов индуцируют добавку

$$U_W \sim \sigma P$$

к потенциалу среднего ядерного поля, то одночастичные орбиты получают примеси порядка

$$\alpha_{s.p.} \sim \overline{U_W}/\omega_0,$$

где $\overline{U_W}$ — типичный матричный элемент слабого возмущения между нуклонными состояниями разной четности, которые принадлежат соседним оболочкам, разделенным по энергии на ω_0 .

В составном ядре смешивающиеся сложные состояния имеют разности энергий $\Delta E \sim D$, а волновые функции без учета слабого взаимодействия представляются некогерентными суперпозициями (2), где φ_i — оболочечные детерминанты Слэтера. Одночастичный оператор U_W в каждом детерминанте φ_i переводит одну частицу на ближайшую пустую оболочку другой четности, отбирая в конечном состоянии соответствующий детерминант φ_j . Амплитуды этих детерминантов в функциях компаунд-состояния суть $1/\sqrt{N}$ и $(\Gamma_\downarrow/\omega_0\sqrt{N})$, ибо фрагментация распространяется на интервал энергий $\Gamma_\downarrow < \omega_0$ и вклады далеких компонент в суперпозицию подавлены в отношении $\Gamma_\downarrow/\omega_0$. При небольших энергиях возбуждения число частиц, переходы которых разрешены, $\sim A^{2/3}$, так что средний квадрат матричного элемента слабого возмущения дается квадратом некогерентной суммы $A^{2/3}N$ слагаемых, каждое из которых имеет порядок величины

$\overline{U}_W \frac{\Gamma_{\downarrow}}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{N}}$. Учитывая, что $D \sim \Gamma_{\downarrow}/N$, находим амплитуду смешивания близких компаунд-состояний:

$$\alpha_{cc'} \sim \frac{(H_W)_{cc'}}{D} \sim \frac{1}{D} A^{1/3} \sqrt{N} \overline{U}_W \frac{\Gamma_{\downarrow}}{\omega_0} \frac{1}{N} \sim \frac{\overline{U}_W}{\omega_0} A^{1/3} \sqrt{N}. \quad (10)$$

Таким образом, фактор усиления по сравнению со смешиванием одностатичных уровней составляет

$$\frac{\alpha_{cc'}}{\alpha_{s.p.}} \sim A^{1/3} \sqrt{N}. \quad (11)$$

Вернемся теперь к обсуждению области более высоких энергий возбуждения, где время жизни состояний не столь велико, чтобы обеспечить установление полного равновесия ($\Gamma \sim D$ или $\Gamma > D$), так что уровни возбужденной системы перекрываются и результат процесса может зависеть от детальных фазовых соотношений между компонентами начального состояния^[13]. Фактически такая ситуация является скорее правилом, чем исключением^[38], реализуясь уже при энергиях возбуждения в несколько МэВ над порогом испускания частиц. Если вклады в амплитуду реакции $f(E)$ при данной энергии E от большого числа перекрывающихся уровней статистически независимы, то флуктуации сечений $\sigma(E) \sim |f(E)|^2$ будут порядка единицы по сравнению с самими сечениями. Хорошо известным классическим аналогом являются рэлеевские флуктуации интенсивности I поля, создаваемого большим числом N одинаковых источников с полностью некоррелированными фазами, $(\Delta I)^2/I^2 \sim 1$ при $N \gg 1$. Наличие таких резких флуктуационных энергетических зависимостей было предсказано теоретически («эриксоновские флуктуации») и затем наблюдалось в большом числе экспериментальных работ. Корреляции сечений при разных энергиях определяются размытостью энергий отдельных промежуточных состояний, т.е. характерными величинами Γ или временами $\tau \sim \hbar/\Gamma$. Учет лишь той части компаунд-процессов, которая связана с наиболее долгоживущими ядерными состояниями, является чрезмерным упрощением. Существует потенциальное рассеяние, искажение падающей волны поглощением в компаунд-состояния с необходимостью приводит к упругому рассеянию теневого (дифракционного) типа, идут прямые процессы быстрого (квазиупругого) выбивания нуклонов или кластеров и т.д. Эти процессы не разнесены заметно во времени с начальным состоянием, и, как подчеркивалось в^[39], их распознавание родственно задаче о выделении сигнала из шумов. Прямые и компаунд-реакции являются, очевидно, лишь предельными случаями реальной ситуации, когда экспериментальная картина сечений, энергетических и угловых распределений создается наложением результатов многих процессов разной временной длительности^[40,41] и разной степени сложности механизма.

Фактически мы вступаем здесь в новую область, находящуюся еще в начальной стадии развития, — ядерную кинетику. Здесь стоит задача анализа временного хода ядерной реакции, установления иерархии состояний все возрастающей сложности, через которую идет процесс, связи этих состояний с соответствующими масштабами флуктуаций энергетических спектров и особенностей угловых распределений^[42,43]. Г. Фенбахом было введено понятие «проходных» (doorway) состояний как первой стадии начинающегося процесса релаксации сильно неравновесного ядра, получившего исходное возбуждение. Скорее всего, это должны быть состояния сравнительно простой природы (частично-дырочные или их суперпозиции типа гигантских резонансов). Эти состояния нестационарны. Дальнейшая релаксация ведет как к размешиванию возбуждения среди состояний родственной природы, так и к более сложным состояниям. Энтропия растет, и эволюция стремится к равновесному распределению энергии возбуждения между степенями свободы. На каждом этапе возможен вылет частиц, несущих информацию о длительности соответствующей стадии. Таким образом, среди продуктов реакции могут быть прямые, предравновесные и равновесные (испарительные)^[44]; соответствующая постановка эксперимента может их разделять.

Сейчас развито несколько подходов, описывающих картину предравновесных процессов^[45–47]. В определенных предположениях о хаотичности матричных элементов, описывающих переходы, строится феноменологическая кинетическая схема последовательной эволюции системы между классами внутренних состояний. Двумя основными недостатками существующих теорий являются:

- 1) отсутствие прямой связи с микроскопической структурой данного ядра и конкретным ядерным гамильтонианом;
- 2) неясная степень обоснованности правдоподобных гипотез о хаотичности.

Конкретные расчеты можно пока провести лишь в каскадных^[48] или экситонных^[49] моделях. Каскадные расчеты моделируют процесс парными нуклонными соударениями, но применимость такого газового приближения остается сомнительной, по крайней мере в области не слишком высоких энергий возбуждения.

В экситонных моделях внутренние состояния классифицируются по числу частично-дырочных возбуждений. Правильность гипотезы о быстрой релаксации внутри каждого такого класса по сравнению с переходами в более сложные конфигурации остается под вопросом. В возбуждениях типа резонанса или глубоких дырочных состояний более приемлемым выглядит обратное предположение. Конечно, упомянутые трудности отражают общие проблемы развития кинетической теории в квантовых системах с сильным взаимодействием.

Эти трудности усугубляются спецификой ядра как конечной ферми-системы, где необходимо учитывать дискретность спектра, отсутствие аддитивных интегралов движения типа импульса и связь с континуумом. Развитие микроскопического подхода в ядерной кинетике остается еще задачей будущего. Мы ограничились здесь кру-

гом вопросов, непосредственно связанных с гипотезой Н. Бора о составном ядре. Может быть, наиболее ярко вся проблема статистических закономерностей в такой небольшой квантовой системе, как атомное ядро, выступает в физике тяжелых ионов, успехи которой за последнее время являются впечатляющими. Упомянем лишь открытие глубоко неупругих столкновений тяжелых ионов^[50], в которых образуется сравнительно долгоживущая двойная ядерная система, релаксирующая к равновесию, но распадающаяся до его достижения. Угловое распределение продуктов дает фактически развертку процесса релаксации, предоставляя уникальную возможность следить за поведением различных ядерных характеристик во времени.

Одним из наиболее интересных результатов здесь являются указания на важную роль когерентных коллективных явлений, которые обычно не учитываются в статистическом рассмотрении.

Наконец, столкновения релятивистских тяжелых ионов, к которым в полной мере относятся соображения о составном ядре, открывают новую область на диаграмме состояния ядерного вещества, позволяя искать аномальные его фазы — сверхплотную материю, мезонный конденсат, кварк-глюонную плазму.

2. ВОЗБУЖДЕНИЯ В ЯДРАХ: НЕЗАВИСИМЫЕ ЧАСТИЦЫ ИЛИ КОЛЛЕКТИВНЫЕ ДВИЖЕНИЯ

«В то время как большинство людей быстрее всего замечают разницу между похожими предметами, для Бора было естественно находить общее в крайне противоположных явлениях».

О. Клейн (^[179], с. 288)

2.1. Макроскопические коллективные моды

В статье «Единство знаний»^[51] Н. Бор писал: «... Ни один опытный факт не может быть сформулирован помимо некоторой системы понятий», и далее: «... Всякая кажущаяся дисгармония между опытными фактами может быть устранена только путем надлежащего расширения этой системы понятий». Вместе с концепцией составного ядра Н. Бор ввел в ядерную физику еще одно ключевое понятие — коллективное движение. Именно картину коллективного возбуждения системы многих тел, привычную при рассмотрении макроскопических систем, он противопоставлял представлению о ядре как совокупности почти независимых нуклонов.

В распоряжении Н. Бора не было еще достаточной спектроскопической информации, чтобы с определенностью говорить о конкретных типах коллективного движения в ядрах. Однако он сразу обратил внимание^[4] на доминирующую роль в ядерном γ -излучении элек-

трической квадрупольной компоненты. Дипольное излучение ядром длинноволновых квантов обязательно связано с движением протонов относительно нейтронов, т.е. не может быть полностью когерентным. Такого запрета нет для квадрупольного излучения. Н. Бор указывал также^[8] классические ситуации, где может быть подавлено и квадрупольное излучение или даже испускание γ -квантов вообще (радикальные пульсации однородного тела или его вращение вокруг оси симметрии).

Исходя из лежащего в основе идеи промежуточного ядра сопоставления с конденсированными средами, Н. Бор и Ф. Калькар^[8] дали первые оценки возможных в ядре «макроскопических» коллективных мод. Два соображения делают такие оценки почти однозначными. Во-первых, размеры ядра по соотношению неопределенности задают среднюю кинетическую энергию $\bar{\epsilon}$ частиц. Во-вторых, интенсивные свойства большинства ядер, кроме наиболее легких, в грубом приближении универсальны. Тогда и упругие их характеристики тоже должны быть примерно постоянными. Используя макроскопические аналоги, Н. Бор и Ф. Калькар показали, что в ядре следует ожидать возможности упругих колебаний с плавно меняющейся в зависимости от массового числа энергией кванта $\hbar\omega \sim \bar{\epsilon}A^{-1/3}$, если колебания носят объемный характер, или $\hbar\omega \sim \bar{\epsilon}A^{-1/2}$ для поверхностных колебаний. Возвращающей силой в этих двух случаях служат соответственно объемные силы упругости и поверхностное натяжение.

Такие колебания жидкокапельного типа даже в наиболее тяжелых ядрах отвечают энергиям кванта > 2 МэВ. Поэтому, отмечают далее Н. Бор и Ф. Калькар, наименее возбужденные состояния ядер должны иметь другую природу. Авторы указывают свидетельства существования других типов возбуждений в ядрах. В первую очередь они отнесли сюда периодические изменения энергий связи ядер вдоль таблицы элементов и заметное превышение энергий первых возбужденных состояний в четно-четных ядрах по сравнению с ядрами, нечетными по одному или обоим сортам нуклонов. Отдельно обсуждается вопрос о связи орбитальных и спиновых моментов отдельных частиц, что могло бы привести к аналогу тонкой структуры в ядерных спектрах. Наконец, высказывается гипотеза о возможности коллективного сложения орбитальных моментов, дающего картину, подобную картине вращающегося твердого тела. Соответствующие энергетические интервалы ΔE_r между нижними ротационными состояниями должны быть обратно пропорциональны моменту инерции \mathcal{J} , т.е. по твердотельной оценке малы, $\Delta E_r \sim \mathcal{J}^{-1} \sim A^{-5/3}$. Правда, авторы отмечают возникающее противоречие такого «квантитвердого» вращения с жидкокапельными свойствами ядра.

Сегодня, спустя почти полвека после работы Н. Бора и Ф. Калькара, мы отчетливо видим, что в ней, как в зародыше, сосредоточена программа будущих экспериментальных и теоретических исследований ядерных возбуждений, причем предвосхищены именно те узловые точки, из которых выросли наиболее важные результа-

ты, сложившиеся сейчас в общепринятые представления о ядерной структуре^[17,52].

2.2. Могут ли проявляться одночастичные степени свободы?

Огромная экспериментальная информация, в том числе отмеченное Н. Бором и Ф. Калькаром периодическое изменение ядерных свойств, указывает на то, что, несмотря на сильное взаимодействие нуклонов между собой, одночастичное движение сохраняется в ядрах как самостоятельный тип возбуждения. Не будучи точным стационарным состоянием, это движение затухает со временем, что в оптической модели описывается суммарным образом с помощью комплексного потенциала. Резкое уменьшение плотности уровней с уменьшением энергии возбуждения естественным образом должно увеличивать время жизни одночастичных состояний. В пределе возникает картина простого движения частиц в вещественной потенциальной яме, где заполняются в соответствии с принципом Паули наинизшие одночастичные уровни, определяя тем самым конфигурацию основного состояния ядра. Простейшие возбужденные состояния описываются тогда некоторым числом пар частица — дырка.

Как упоминалось в гл. 1, существуют^[29] простые квазиклассические причины для группировки собственных значений энергии в оболочку, вследствие чего плотность одночастичных уровней оказывается не равномерной, а модулированной с частотой ω_0 (типичное расстояние между оболочками, которое определяется условиями отражения на границе ядра устойчивых волновых пакетов, т.е. геометрией потенциала, и поэтому совпадает с боровской оценкой $\bar{\epsilon}A^{-1/3}$ для объемных упругих волн). В иерархии усложняющихся состояний одночастичное движение отвечает максимальным корреляционным ширинам $\Gamma_{s.p.} \sim \hbar\omega_0 \sim \hbar/\tau_{s.p.}$, где $\tau_{s.p.} \sim R/v \sim \hbar A^{1/3}/\bar{\epsilon}$ — время пролета частицы через ядро.

Задачей разумной оболочечной схемы является не только качественное объяснение периодичности ядерных свойств, но и, главным образом, конкретное предсказание последовательности энергий и квантовых чисел одночастичных орбит, а тем самым магических чисел. Первые варианты модели оболочек давали правильные магические числа только для нижних оболочек. Это обстоятельство, наряду с неясной степенью обоснованности наивной картины независимых частиц при наличии сильного взаимодействия между ними, влекло за собой недоверие ко всем моделям такого рода. Это недоверие четко высказывалось и Н. Бором, выдвигавшим^[5] в противовес представлению о запутанном коллективном движении в компаунд-ядре. Тем не менее оказалось возможным найти^[53] простую модификацию модели оболочек, где с помощью введения, дополнительно к центральному потенциалу, спин-орбитального расщепления нуклонных орбит по полному моменту $\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s}$ удалось поставить на нужные места все магические числа и правильно предсказать почти для

всех ядер спины основных состояний. Дальнейшая история развития привела к внутреннему синтезу представлений об одночастичном и коллективном движении в ядрах.

Вполне однозначными рецепты простой модели сферических оболочек могут быть лишь для магических и соседних с ними ядер, имеющих одну лишнюю частицу или дырку. Заполненные оболочки с необходимостью обладают квантовыми числами $J^P = 0^+$, соседние же с магическими ядра должны иметь спин и четность, совпадающие с моментом j и четностью ближайшей орбиты, к которой принадлежит последний нуклон (или дырка). Для остальных ядер оболочечная модель определяет лишь основную конфигурацию валентных нуклонов, но требует добавочных гипотез типа атомных правил Хунда, чтобы дать ответ на упоминавшийся Н. Бором вопрос о схеме сложения моментов на частично заполненных орбитах. Эмпирический факт, что все основные состояния четно-четных ядер характеризуются квантовыми числами 0^+ , подсказывает гипотезу о спаривании нуклонов на вырожденных орбитах (j, m) и $(j, -m)$, переходящих друг в друга при обращении времени. Энергетическая выгодность спаривания явно следует из разности масс четных и нечетных ядер, добавляющейся к оболочечным вариациям, и из различия плотностей низколежащих уровней (как упоминалось выше, на это также обращали внимание Н. Бор и Ф. Калькар^[8]). Это однозначно отождествляет спин J_0 основного состояния нечетного ядра с моментом j орбиты неспаренного нуклона.

Оболочечная модель со спин-орбитальной связью и правилом спаривания является, в тех или иных модификациях, базой практически всех расчетов структуры сложных ядер. Однако на этом уровне речь может идти лишь об одночастичных характеристиках: спины и четности основных состояний и возбуждений типа частица-дырка, статические мультипольные моменты состояний с одним неспаренным нуклоном, вероятности β -распада, электромагнитных одночастичных переходов и реакций типа прямого выбивания, срыва или подхвата нуклонов. Большим качественным успехом модели оболочек явилось объяснение островков изомерии — групп ядер, где уровень с большим $j = l + 1/2$, опустившийся вследствие спин-орбитального расщепления в нижнюю оболочку, оказывается в окружении уровней другой четности с заметно отличающимся j , что приводит к сильному подавлению γ -переходов между ними и возникновению изомерных состояний.

В целом нет сомнений в реальности нуклонных оболочек. Численные же предсказания зачастую согласуются с экспериментом в лучшем случае по порядку величины и по некоторым качественным тенденциям. Магнитные моменты нечетных ядер систематически отклоняются внутрь от простых оболочечных предсказаний (линии Шмидта^[17]) на величину порядка 1 я. м., хотя, казалось бы, они полностью обусловлены одним неспаренным нуклоном. Еще хуже обстоит дело с электрическими квадрупольными моментами, которые

при заполнении оболочки начинают заметно превышать оболочечные предсказания, оказываясь к тому же величинами одного порядка как для протонно-нечетных, так и для нейтронно-нечетных ядер. Есть области ядер (например, редкоземельные и следующие за ними ядра с $A = 150 - 180$ и и тяжелые ядра с $A > 220$), где модель оболочек не может объяснить даже спины основных состояний.

2.3. На пути к обобщенной модели

Накопление экспериментальной информации по большой совокупности ядер позволило на рубеже 50-х годов сделать новый шаг в понимании ядерной структуры, связанный с выдвинутой Дж. Рейнуотером, О. Бором и Б. Моттelsonом идеей деформации ядер^[54–56]. Ясно, что модель независимых частиц, где взаимодействие нуклонов целиком сведено к среднему потенциальному полю, может служить лишь первым приближением к более точному описанию. Заведомо должны существовать «остаточные» силы, приводящие к корреляциям нуклонов. Один тип таких корреляций — спаривательные — уже упоминался. При серьезном учете остаточных взаимодействий возникает смешивание оболочечных конфигураций. Поскольку заранее остаточные силы неизвестны, важны физические соображения, выделяющие основные компоненты этих сил.

Пусть силы таковы, что предпочитают максимальное перекрытие нуклонных волновых функций. Добавление нуклона сверх магического остова на определенный уровень с моментом j и проекцией $j_z = m$ фиксирует в квазиклассическом приближении «плоскость орбиты». Тогда с точки зрения корреляций нуклонов выгодно несколько исказить сферический остов, деформировав его в соответствии с орбитой внешнего нуклона. В терминах квантовой теории возмущений эта «связь нуклонов с поверхностью» означает поляризацию остова — примесь к замкнутой конфигурации виртуальных возбуждений типа частица-дырка с «правильной» пространственной ориентацией. Конечно, искажение одним внешним нуклоном созданного всеми частицами среднего поля мало, но эта малость может в значительной степени компенсироваться когерентными вкладами в поляризацию остова от большого числа внутренних нуклонов. В результате мультипольные моменты нечетного ядра (в первую очередь, электрический квадруполь) приобретают обусловленную остаточными ядерными силами добавку, точная величина которой зависит от поляризуемости остова полем данной симметрии. Заметим, что о поляризуемости ядра также было, по-видимому, впервые сказано Н. Бором в работе^[57] 1938 г.

В магических ядрах квадрупольная поляризуемость ядра невелика, так как квадрупольные переходы с рождением пары частица-дырка требуют из-за сохранения четности большой энергии $\sim 2\hbar\omega_0$. С увеличением числа валентных нуклонов ситуация меняется, когерентно складываются их усилия по поляризации остова и добавляют-

ся еще низкоэнергетические виртуальные переходы самих валентных нуклонов; можно ожидать, что система становится все более «мягкой». При этом принципиальная разница нечетных и четно-четных ядер теряется: во втором случае роль затравочного поля может играть виртуальный разрыв сферической пары нуклонов. Такое возбуждение создает вынужденную поляризацию остова, и если потенциальная энергия деформации при этом растет, то возникают самоподдерживающиеся колебания вокруг сферической формы.

Действительно, почти во всех четно-четных ядрах первое возбужденное состояние имеет квантовые числа 2^+ . Энергия $E(2^+)$, которую естественно сопоставить с частотой колебательного кванта, быстро падает при заполнении оболочки. В магических и околомагических ядрах значение $E(2^+)$ примерно согласуется с частотой квадрупольных поверхностных колебаний заряженной жидкой капли. Но при удалении от магического ядра гидродинамические оценки завышают значение $E(2^+)$ в 4–5 раз. Одновременно со смягчением квадрупольной колебательной моды растут вероятности E2-переходов между основным и одноквантовым состояниями. В типичных сферических ядрах эти вероятности в несколько десятков раз превышают характерные вероятности одночастичных переходов, явно демонстрируя коллективный характер движения.

2.4. Фононы в ядрах

Вибрационная картина квадрупольных возбуждений подтверждается наличием в низколежащей области спектра серий состояний, подобных колебательным полосам в молекулах. Вблизи энергии $2E(2^+)$ во многих сферических ядрах найдены триплеты близких состояний 4^+ , 2^+ , 0^+ , которые можно интерпретировать как двухквантовые квадрупольные уровни. В идеальном случае невзаимодействующих квантов (гармоническое приближение^[58]) оператор квадрупольного момента, индуцирующий E2-переходы, пропорционален координате квадрупольного осциллятора. Поэтому разрешены лишь переходы с изменением числа квантов n на $\Delta n = \pm 1$, причем для всех уровней двухквантового триплета приведенная вероятность перехода в однофононное состояние должна вдвое превышать вероятность перехода из однофононного в основное состояние.

Существуют и состояния, которым можно приписать многоквантовую структуру. В частности, большая информация собрана по так называемым ираст-полосам, объединяющим уровни ядра с наименьшей энергией для разных значений полного момента I . В сферических ядрах можно проследить ираст-полосы с четными $I = 2n$ и положительной четностью, имеющие, вероятно, n -квантовую природу (это те члены n -квантового мультиплета, где моменты квантов выстраиваются в максимально возможное значение $2n$). В гармонической ситуации вдоль ираст-полосы должны идти интенсивные E2-

переходы с типичным «лазерным» фактором индуцированного усиления \sqrt{n} в амплитуде перехода $n \rightarrow n - 1$ ^[52].

Феноменологическая теория гармонических мультипольных колебаний строилась первоначально^[58] на основе квантования малых отклонений от равновесия в капле идеальной жидкости. Реально, однако, основные черты феноменологического описания зависят лишь от предполагаемой симметрии возбуждений и сохраняют силу безотносительно к модели жидкой капли. Экспериментальная картина низколежащих коллективных состояний в целом укладывается^[52] в схему квадрупольных колебаний. Сильным аргументом в пользу этой схемы является мощная коллективизация квадрупольных переходов с $|\Delta n| = 1$ и слабость тех переходов, которые отсутствуют в гармоническом приближении ($|\Delta n| = 2$ и $\Delta n = 0$). И все же гармоническое приближение оказывается явно недостаточным. Энергетические интервалы и вероятности электромагнитных переходов заметно отклоняются от простых предсказаний гармонической модели, мультиплеты сильно расщеплены по полному моменту, обнаружены ненулевые средние значения квадрупольного момента в первом возбужденном состоянии 2^+ , строго запрещенные в гармоническом приближении (аналог равенства нулю средней координаты осциллятора в состоянии с определенным числом квантов). Квадрупольное колебательное движение является сильно ангармоническим^[59].

Это и понятно, так как из-за малости частот ω_0 в мягких сферических ядрах амплитуда квадрупольных отклонений от равновесной формы слишком велика, чтобы теория малых колебаний оставалась в силе. Мы имеем дело с медленным коллективным движением больших масштабов, к которому адиабатически подстраиваются одночастичные степени свободы. Таким образом, заметную долю времени нуклоны движутся в деформированном среднем поле, и понятие формы ядра становится несколько условным.

2.5. Деформация ядер

Мягкость ядра с большой амплитудой нулевых колебаний означает близость его к точке неустойчивости. Обращение ω_0 в нуль свидетельствовало бы о необходимости перестройки основного состояния (аналог фазового перехода второго рода) в ту сторону, которая указывается природой мягкой моды. Хорошо известны резкие изменения^[52] ядерных свойств от одного ядра к соседнему (например, при добавлении пары нейтронов к изотопам с $N = 88$ мягкое сферическое ядро сменяется статически деформированным). Деформация наступает, по-видимому, несколько раньше точки, где $\omega_0 \rightarrow 0$ и переход по терминологии статистической физики можно было бы назвать переходом первого рода в присутствии мягкой моды. Здесь деформированное среднее поле обеспечивает более глубокий минимум энергии, чем сферическое. После возникновения статической деформации меняются квантовые числа одночастичных орбит — вместо центральной симметрии поля остается лишь аксиальная (пока

с достоверностью неизвестны ядра, не имеющие в основном состоянии оси симметрии, хотя вопрос этот интенсивно обсуждается^[60]), и распределение орбит по энергии становится более равномерным. В случае квадрупольной деформации (возможно, что ядра в районе $A = 220-230$ имеют стабильную октаупольную деформацию^[61]) сохраняется вырождение по знаку проекции момента частиц на ось симметрии, а вместе с ним и спаривание частиц на вырожденных орбитах, связанных между собой обращением времени.

Деформированные ядра обычно являются более жесткими, чем типичные сферические. Из пяти квадрупольных колебательных мод в сферическом ядре, вырожденных по проекции момента, в случае аксиальной деформации остаются две (колебания продольные и поперечные по отношению к оси сфероиды). Это — так называемые β - и γ -моды, частоты которых слабо меняются от ядра к ядру, имея порядок величины 1 МэВ. Соответствующая амплитуда колебаний мала по сравнению со статической деформацией, и эффекты ангармоничности не столь принципиальны, как в мягких сферических ядрах. Оставшиеся три квадрупольные степени свободы определяют пространственную ориентацию деформированного ядра. При этом возникает возможность предсказанного Н. Бором и Ф. Калькармом вращательного движения.

2.6. Вращения ядер. Твердое тело или жидкая капля?

Ротационные полосы являются наиболее ярким отличительным признаком спектров несферических ядер^[62]. Как следует из боровских оценок (гл. 1), вращательное движение — самое медленное ядерное возбуждение. Оно адиабатично по отношению к другим степеням свободы, и на каждой одночастичной конфигурации (или на колебательном состоянии) можно построить свою вращательную полосу. Коллективное вращение может происходить лишь вокруг осей, перпендикулярных оси симметрии. Каждая полоса при этом приближенно характеризуется значением K проекции внутреннего момента конфигурации на ось симметрии. В силу неинерциального характера системы отсчета, связанной с вращающимся ядром, возникают центробежные и кориолисовы эффекты, перемешивающие полосы с разными K .

При небольших угловых моментах J кориолисовы силы малы и спектр вращательной полосы представляется простым выражением для ротатора с фиксированным моментом инерции \mathcal{J} ,

$$E_J = \text{const} + \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2\mathcal{J}}. \quad (12)$$

Вероятности переходов между полосами в предположении неизменности их внутренней структуры удовлетворяют геометрическим правилам интенсивности^[63], которые примерно выполнены на опыте.

Глубокие физические проблемы связаны с величиной момента инерции^[64]. Эта величина легко вычисляется в молекулярных систе-

мах, где существует естественный каркас, с которым можно связать оси подвижной системы координат. Тогда нетрудно выразить углы, определяющие ориентацию каркаса, через координаты ядер и выделить энергию вращения (12) как составную часть оператора кинетической энергии системы. В ядре, состоящем из тождественных частиц, однозначный рецепт выделения коллективных углов отсутствует. Обычные способы рассмотрения состоят в принудительном внешнем вращении системы с некоторой угловой скоростью Ω и отыскании коэффициента пропорциональности между возникшим средним значением углового момента $\langle J \rangle$ и величиной Ω : $\hbar \langle J \rangle = \mathcal{J} \Omega$. Микроскопическая обоснованность этой процедуры (кренкинг-модель^[65]) для ядер со стабильной аксиальной деформацией была показана значительно позже^[66].

Применение модели принудительного вращения даст существенно различные результаты для идеальной жидкости и для газа независимых фермионов. Мы уже упоминали о боровском противопоставлении жидкокапельной и твердотельной картин. Ферми-газ в несферическом среднем поле вращается^[65,67] (с квазиклассической точностью) как твердое тело с таким же пространственным распределением плотности. Этот результат близок по смыслу к знаменитой теореме Н. Бора – ван Леевен^[68,69] об отсутствии магнетизма в классической равновесной системе зарядов. Причиной является сохранение изотропии распределения по скоростям в каждой точке даже при наложении однородного магнитного поля. Аналогично этому во вращающемся ферми-газе кориолисов член $-\Omega \mathbf{J}$ в квазиклассическом приближении не меняет изотропии распределения по скоростям относительно вращающейся системы, так что поле скоростей является чисто переносным, $\mathbf{v} = [\Omega \mathbf{r}]$, и вращение носит твердотельный характер, $\mathcal{J} = \mathcal{J}_{\text{ТВ}}$.

С другой стороны, потенциальное течение идеальной жидкости в несферическом вращающемся сосуде требует значительно большей энергии для создания такого же полного момента, что отвечает^[62] малому гидродинамическому моменту инерции $\mathcal{J}_{\text{Г.д.}} \simeq \mathcal{J}_{\text{ТВ}} \beta^2$, где $\beta = \Delta R/R$ — параметр несферичности (в типичных деформированных ядрах $\beta \simeq 0.2 - 0.3$). Картина вращения здесь ближе к распространению поверхностной волны с перекачиванием несферической «горбушки». Экспериментальные моменты инерции оказываются лежащими между гидродинамической и твердотельной границами, $\mathcal{J} \simeq (1/2 \div 1/3) \mathcal{J}_{\text{ТВ}}$.

2.7. Парные корреляции в ядре. Сверхтекучесть

Важным шагом в дальнейшем углублении понимания ядерной структуры явилось развитие микроскопической теории парных корреляций^[70–72]. Феноменологическое введение спаривания в модель независимых частиц, необходимое для однозначности ее предсказаний, сменилось осознанием того факта, что система нуклонов в сложных ядрах является сверхтекучей (сверхпроводящей). Конечно,

такая связь могла быть установлена только после построения микроскопической теории сверхпроводимости металлов. По этому образцу была теперь сформулирована и теория парных корреляций в ядрах. Выяснилось, что кроме тех лежащих на поверхности явлений, которые ассоциировались с влиянием спаривания раньше, на самом деле парные корреляции влияют почти на все свойства как одночастичных, так и коллективных возбуждений.

Из-за присутствия конденсата куперовских пар неспаренные частицы нужно рассматривать как новые элементарные возбуждения — квазичастицы, являющиеся суперпозициями старых частиц и дырок. Спектр оболочечных возбуждений ϵ_λ приобретает щель $\epsilon_\lambda \rightarrow E_\lambda = \sqrt{\epsilon_\lambda^2 + \Delta^2}$, плотность низколежащих уровней сильно уменьшается, а все одночастичные матричные элементы перенормируются. Величина щели $\Delta \sim 1$ МэВ согласуется с разностями масс четно-нечетных ядер. Заметим, что в среднем значение Δ уменьшается $\sim A^{-1/2}$ в сторону тяжелых ядер. Не есть ли это указание на преобладающую роль поверхностной области в парных корреляциях? Такие соображения высказывались неоднократно, но однозначного ответа пока нет.

Спаривание сверхпроводящего типа радикально меняет характеристики низколежащих коллективных возбуждений^[71]. Известно, что в нормальном ферми-газе при низких температурах не могут распространяться волны со скоростью s меньше скорости v_F частиц на границе Ферми: в континууме возбуждений частица – дырка найдется такое, в которое сможет перейти волновой квант с выполнением законов сохранения энергии и импульса, что приведет к быстрому поглощению волн (трансформации их в движение некоррелированных частиц и дырок). Это относится и к обычному звуку, который требует достаточно большой частоты столкновений частиц $\omega_{\text{ст}} > \omega_{\text{зв}}$, чтобы успевало установиться равновесное импульсное распределение при сжатиях и разрежениях среды; в вырожденном же ферми-газе столкновения вымирают. Л.Д. Ландау^[73] указал на возможность распространения волн так называемого нулевого звука с $s > v_F$ и $\omega_{\text{зв}} > \omega_{\text{ст}}$, закон дисперсии которых не попадает в континуум частица – дырка. Эти бесстолкновительные волны можно представлять как распространение деформации ферми-поверхности, где упругость самосогласованно создается взаимодействием частиц. Низколежащие коллективные волны возрождаются^[74] в сверхпроводящих системах, где нижняя граница парного континуума равна не нулю, а 2Δ .

Качественные черты такой ситуации сохраняются и в ядрах. Мягкие квадрупольные колебания ядер имеют частоту $\omega < 2\Delta$ (а в типичных сферических ядрах $\zeta = \omega/2\Delta \ll 1$), и их можно интерпретировать как волны разрыва куперовских пар и создания коррелированных двухквазичастичных состояний — квадрупольных фононов, энергия которых понижена по сравнению с 2Δ за счет квадрупольной компоненты остаточного взаимодействия квазичастиц, усиленной вследствие поляризации остова. В околomagических ядрах ко-

лебания «естественных» мультипольностей (2^+ , 3^- , ...) похожи на боровские жидкокапельные моды^[75]. Из-за оболочечного просвета ω_0 в плотности одночастичных уровней кванты колебаний здесь скорее аналогичны экситонам в полупроводниках. В мягких же сферических ядрах с $\zeta \ll 1$ начинает доминировать «металлическое» поведение сверхпроводящих нуклонов внешних оболочек, приводящее к наблюдаемым низкоэнергетическим модам. Наконец, высоколежащие гигантские резонансы менее чувствительны к оболочечным эффектам и ближе всего к нулевому звуку Ландау.

В области низколежащих мод основной проблемой остается структура спектров мягких сферических ядер. Последовательное микроскопическое описание ангармоничности, инициированное работой^[59], связано с очень сложными численными расчетами. Поэтому полезным было бы выделение — из теоретических соображений и с помощью анализа данных — основных ангармонических эффектов. В рамках классической феноменологической теории старшие поправки к гармоническому приближению^[58] даются вследствие малой частоты ω и большой амплитуды колебаний $\sim 1/\sqrt{\omega}$ нелинейными слагаемыми потенциальной энергии. Коллективный фонон является суперпозицией типа (2) большого числа частично-дырочных возбуждений данной симметрии. Но в отличие от (2), фононная суперпозиция является когерентной, что и дает усиление вероятностей (коллективизацию) переходов. Наличие малых параметров адиабатичности $\zeta = \omega/2\Delta$ и коллективности $1/\sqrt{N}$ позволяет провести дискриминацию и выбрать из массы возможных поправочных членов^[76] главные. Основными в типичных случаях оказываются^[77] сильная четырехфононная ангармоничность и добавки ротационного типа (24) к энергиям многофононных состояний, связанные с виртуальной деформацией медленно колеблющегося ядра и появляющейся из-за этого степенью свободы коллективного вращения. Такой анализ выявляет новые нетривиальные регулярности колебательных спектров. Замечательно, что несмотря на сильное несохранение числа квантов ангармоническими добавками, общая структура спектра фононных мультиплетов сохраняется в точных нелинейных решениях^[78]. Однако детальная подгонка спектров по многим ядрам требует введения дополнительных параметров и еще не проведена.

В более разработанном состоянии находится другой подход — так называемая модель взаимодействующих бозонов (МВБ)^[79–81], где оставляются лишь члены ангармонического гамильтониана, сохраняющие полное число квантов. В первоначальной формулировке МВБ фононы интерпретировались как образы пар фермионов и учитывались лишь s- и d-кванты, моделирующие конденсатные ($l = 0$) и квадрупольно возбужденные ($l = 2$) нуклонные пары. Такая буквальная интерпретация не имеет достаточного микроскопического обоснования^[77] и приводит к ряду слишком жестких предсказаний, не находящихся экспериментального подтверждения. Например, в системе $2N$ фермионов сверх магического ядра суммарное число бозо-

нов s- и d-типов следует положить равным $n = N$ и все вращательные полосы должны обрезаться на максимальном моменте $J = 2N$, когда произошел полный переход $s \rightarrow d$. Такого обрыва полос не наблюдается. Стремление избавиться от этих искусственных эффектов заставляет вводить много новых параметров.

Таким образом, описание мягких сферических и переходных к деформированным ядер оказалось более сложной теоретической задачей, чем ядер со стабильной деформацией. Это связано с большой амплитудой коллективного движения, в силу чего базис исходных сферических оболочек недостаточно адекватен для описания флуктуации ядерного поля.

2.8. Гигантские резонансы

Отдельной и очень интересной областью изучения коллективного ядерного движения является физика гигантских резонансов^[82]. Специфика ядерного нулевого звука состоит в том, что собственные частоты когерентных суперпозиций частично-дырочных пар попадают в непрерывный спектр. Возбуждение гигантских резонансов разной орбитально-спиновой и изоспиновой структуры наблюдается в многочисленных ядерных процессах; они служат, как обсуждалось в гл. 1, входными состояниями для дальнейшего процесса релаксации. Наблюдаемые ширины этих резонансов велики (≥ 1 МэВ) и связаны^[83,84] с деградацией когерентного движения в менее упорядоченные сложные конфигурации.

Одно из первых обсуждений физики гигантских резонансов было дано все в той же многократно цитированной нами работе Н. Бора и Ф. Калькара^[8]. Эксперимент (опыты Боте-Гентнера^[85] по ядерному фотоэффекту) давал тогда лишь указания на концентрацию силы γ -переходов в области частот, существенно превышающих частоты, которыми характеризовалось бы равновесное тепловое излучение составного ядра. Авторы писали: «В переходах из этих сильно возбужденных состояний ядра в его нормальное состояние проявляются какие-то особые свойства механизма излучения, быть может, связанные с появлением дипольных моментов». Действительно, здесь наблюдался именно дипольный гигантский резонанс (как мы уже отмечали, связанный с относительными колебаниями нейтронов и протонов, т.е. изовекторного характера), которому еще долго суждено было быть единственным представителем большого класса коллективных движений.

Специальному обсуждению ядерного фотоэффекта посвящены две заметки Н. Бора 1938 г.^[57,86] Он отмечает кажущееся противоречие между высокой плотностью ядерных уровней в той области, куда попадает частота резонанса, и самим резонансным характером эффекта. Это свидетельствует о сфазированном коллективном движении, которое оказывается сравнительно долгоживущим даже будучи погруженным в море компаунд-состояний (соответствующий осциллятор имеет высокую добротность). Поэтому возможно наблюдать

случаи испускания до релаксации к равновесию γ -кванта, уносящего всю энергию возбуждения и возвращающего ядро в начальное состояние: «Фотоэффект обусловлен, в первую очередь, взаимодействием с некоторыми специальными колебательными движениями, обладающими особыми излучательными свойствами». (Может быть, еще ярче проявляется та же физика в открытых примерно через 30 лет изобарических аналоговых резонансах^[87], — поднятых на кулоновскую энергию и поэтому попавших в непрерывный спектр состояний, являющихся членами тех же изоспиновых мультиплетов, к которым принадлежат низколежащие состояния соседнего ядра.)

Далее Н. Бор ввел наиболее пригодный для описания резонансных коллективных явлений язык, заимствованный из оптики и связанный с зависящей от частоты восприимчивостью или поляризуемостью системы — «степенью возбудимости» в ней вынужденных колебаний. Используя этот подход, А.Б. Мигдал получил^[88] первые микроскопические оценки характеристик гигантского дипольного резонанса. С помощью соотношений, аналогичных классическому дипольному правилу сумм, и аргументов, основанных на требованиях самосогласованности, можно прийти к почти безмодельным оценкам частот гигантских резонансов высших мультипольностей^[52].

В последнее время интенсивно изучаются гигантские резонансы, включающие спиновые и зарядово-обменные моды возбуждений^[89–91]. Интригующим остается вопрос о возможной роли внутренних возбуждений нуклона^[92,93] (рождение пиона или переход нуклона в изобару), волнообразно передающихся от частицы к частице, формируя своеобразные моды гигантских резонансов.

2.9. Высокоспиновые вращательные состояния

Сверхпроводящие парные корреляции приводят к своеобразию ядерного вращения. Увеличение энергии виртуального разрыва пар и перенормировка спариванием одночастичных матричных элементов ослабляют реакцию системы на медленное внешнее вращение (аналог эффекта Мейсснера). Это объясняет^[71] уменьшение момента инерции ядер по сравнению с твердотельным значением. Заметим, что в ядрах стандартная оценка длины когерентности сверхпроводящего состояния $\xi \sim \hbar v_F / \Delta$ дает величину, превышающую размеры ядра. Поэтому ядра ближе к сверхпроводникам I рода с нелокальным откликом на возмущения. Только в формальном пределе $\Delta > \hbar \omega_0 \sim \varepsilon_F A^{-1/3}$ отклик становится локальным, и момент инерции ядра стремится^[94] к значению для безвихревого течения идеальной жидкости. Корректный учет поправок к модели принудительного вращения, возникающих при более строгом микроскопическом рассмотрении^[66,95], позволяет воспроизвести экспериментальные значения моментов инерции хорошо деформированных ядер^[96].

Продвижение в область высоких угловых моментов, достигнутое в основном при образовании составного ядра в реакциях слияния тяжелых ионов с последующим испусканием нейтронов и γ -квантов,

опускающим ядро в окрестность ираст-линии^[97], открыло совершенно новую область исследования — быстро вращающиеся ядра^[98,99]. Сразу после объяснения влиянием парных корреляций наблюдаемых значений моментов инерции было предсказано^[100,101] аналогичное эффекту разрушения сверхпроводимости магнитным полем явление «кориолисова антиспаривания» — перехода в нормальное состояние с ростом углового момента. Экспериментально был обнаружен^[102] резкий S-образный рост эффективных моментов инерции $\mathcal{J} = \hbar J / \Omega$ при некоторой угловой скорости вращения $\hbar \Omega = dE_J / dJ$. Подобные аномалии момента инерции характерны для очень большого числа ядер при $J \simeq 14 - -20$ ^[103,104]. Однако физика явления оказалась не вполне такой, как ожидалось.

Вместо фазового перехода с разрушением куперовского конденсата происходит нечто вроде эффекта Папена–Бака: разрывается пара на той конкретной орбите, которая сильнее всего подвержена действию кориолисовых сил, и эта пара ориентируется уже не по оси деформации, а по перпендикулярной ей оси вращения^[105]. С точки зрения одночастичного движения во вращающемся потенциале имеет место пересечение полос, и наименьшей (ираст-) полосой становится не полоса, построенная на спаренной конфигурации основного состояния, а двухквазичастичная полоса с выстроенными моментами квазичастиц. Так как обедненный конденсат еще существует, возникает ядерный аналог бесщелевой сверхпроводимости. Эта схема хорошо описывает наблюдаемые явления^[106]. С дальнейшим ростом момента картина усложняется: происходят новые разрывы пар, т.е. пересечения полос, эффективный момент инерции относится теперь к огибающей тех полос, которые последовательно попадают на ираст-линию; одновременно можно ожидать изменения структуры и формы ядра, например центробежного растяжения и возникновения неаксиальной деформации^[107].

Наконец, при еще больших моментах частицы не спарены и ориентируются по оси вращения. Именно здесь должна иметь место упоминавшаяся Н. Бором и Ф. Калькаром^[8] ситуация сложения орбитальных моментов частиц во вращательный момент ядра. Это вращение^[108] не похоже на коллективное вращение, наблюдаемое при малых моментах; здесь ось вращения совпадает с осью симметрии и изменение полного момента требует перераспределения частиц по орбитам, т.е. перехода на полосу, отвечающую другой конфигурации. Однако усреднение по небольшому интервалу моментов, т.е. по нескольким пересечениям, опять даст твердотельный момент инерции^[52]. Из-за одночастичного характера вращения здесь можно ожидать отсутствия усиленных коллективных переходов вдоль ираст-линии и связанного с одночастичными нерегулярностями появления изомерных состояний («ловушки» на ираст-линии^[109]). Предельные моменты вращения ($J \sim 80$), которые может воспринять тя-

⁸Yrast — от древнескандинавского yт — «быстрокрутящийся»: совокупность наименьших по энергии состояний с последовательно возрастающими моментами.

желое ядро, ограничиваются^[110] центробежным выбрасыванием нуклонов или делением, что можно оценить, возвращаясь к макроскопическим эффектам поверхностного натяжения и кулоновского отталкивания. В целом мы видим, что отмеченное Н. Бором и Ф. Калькарсом противоречие между капельными и твердотельными чертами ядерного вращения разрешается далеко не тривиальным образом, обнаруживая глубокую и во многом еще не изученную физику.

2.10. Почему выживает «оболочечная модель» в сильно взаимодействующем коллективе

Обсуждая оболочечную модель, остаточные взаимодействия и связанные с ними коллективные колебания и вращения, мы оставили в стороне самый принципиальный вопрос — почему вообще в системе с сильным взаимодействием можно хотя бы в качестве нулевого приближения принять модель независимых частиц. Ответ на этот вопрос был дан Л.Д. Ландау в теории ферми-жидкости^[73] и строго обоснован В.М. Галицким и А.Б. Мигдалом^[111] с использованием методов квантовой теории поля. Качественно ответ заключается в том, что взаимодействие между частицами «одевает их», превращая в новые объекты — квазичастицы, по-прежнему подчиняющиеся ферми-статистике. Именно с этими объектами на самом деле оперируют модели независимых «частиц». В нормальных ферми-системах можно представить себе процесс одевания с помощью адиабатического включения взаимодействия между исходными частицами. С точностью до неадиабатических поправок в этом процессе сохраняется классификация уровней идеального ферми-газа, связанная с границей Ферми и понятиями частиц и дырок. Однако скорость включения взаимодействия не может быть слишком малой — длительность этого процесса должна быть меньше времени жизни квазичастиц. Поэтому речь может идти лишь о некоторой области возбуждений вблизи границы Ферми, где квазичастицы являются долгоживущими объектами и действительно формируют отклик системы на внешние воздействия.

Около поверхности Ферми время жизни τ_q квазичастиц растет ($\tau_q \sim 1/(\varepsilon - \varepsilon_F)^2$, где ε — энергия квазичастицы) из-за запрета, налагаемого принципом Паули на возможные процессы взаимодействия квазичастиц с фермиевским фоном. Поэтому здесь неопределенность $\Delta\varepsilon \sim \hbar/\tau_q$ энергии квазичастицы мала по сравнению с самой энергией ее возбуждения $|\varepsilon - \varepsilon_F|$, растущей линейно по мере удаления от границы Ферми. В результате систему можно моделировать газом фермиевских квазичастиц, свойства которых (эффективная масса, гиромагнитное отношение, закон дисперсии и т. д.) не совпадают со свойствами «голых» частиц.

Реальный закон дисперсии квазичастиц, реакция системы на внешние поля и свойства возможных здесь коллективных движений управляются эффективным взаимодействием квазичастиц. Это взаимодействие, неявно учитывающее отталкивательную сердцевин-

ну, многократное рассеяние, роль окружающей среды и т. д., приходится феноменологически параметризовать, если нет дополнительных упрощений, позволяющих вычислить его из первых принципов. Проверкой служит сравнение результатов вычислений с опытом. В применении к ядрам такая программа была проведена А.Б. Мигдалом с сотрудниками, сформулировавшими теорию конечных ферми-систем^[112]. В современных вариантах этой теории^[113] эффективное взаимодействие близко к широко используемым силам Скирма — короткодействующим силам, включающим спиновую и спин-орбитальную компоненты, а также зависимость от скоростей и от локальной плотности, что обеспечивает насыщение и правильный переход к пустотным взаимодействиям нуклонов. Легко включаются в общую схему и парные корреляции. Эффективное взаимодействие, в принципе, самосогласованно определяет все наблюдаемые низкоэнергетические ядерные свойства, включая распределение плотности, форму среднего поля и спектр квазичастиц, т.е. параметры модели оболочек, а также такие глобальные характеристики как параметры массовой формулы^[114].

Теория конечных ферми-систем добилась серьезных успехов в описании магических и околоматических ядер. Используя идею локального подобия колебаний формы сдвигу ядра как целого, удается развить теорию низколежащих колебаний и гигантских резонансов в этих ядрах. При этом классическое боровское жидкокапельное приближение возникает как естественный предельный случай поверхностных колебаний ферми-жидкости. Квантовая структура возбуждений индуцирует объемные компоненты колебаний. Согласие расчетов, особенно для коллективных мод типа 3^- в области ядер вблизи дважды магического ^{208}Pb , с результатами современных прецизионных измерений (в рассеянии электронов) переходных форм-факторов (классическими аналогами их являются фурье-компоненты плотности, отвечающие частоте возбуждения) впечатляет.

И все же перед теорией стоят еще серьезные задачи. При обобщении на ядра с большим числом валентных нуклонов возникают трудности как технического характера (пока не удалось, например, развить приемлемые алгоритмы расчетов для деформированных ядер), так и принципиальные. По мере продвижения в глубь оболочки коллективные возбуждения, как обсуждалось выше, становятся все более мягкими, а вместе с ними растут флуктуации среднего поля. Взаимодействие квазичастиц с коллективными возбуждениями^[115] становится все более существенным, определяя, например, спектры нечетных ядер^[56,116]. Поэтому необходимо в эффективное взаимодействие квазичастиц ввести эффекты запаздывания, т.е. энергетическую зависимость. Это приводит к более сложной лагранжевой формулировке^[114] теории конечных ферми-систем. Более того, так как мягкие коллективные моды и неспаренные квазичастицы имеют энергии одного порядка величины, возникают своеобразные резонансные эффекты^[117] и квазичастицы обрастают когерентными фоновыми облаками. Связанные с этим энергетические зависимости

не содержатся в обычной формулировке теории ферми-жидкости, предполагающей плавные изменения всех величин вблизи поверхности Ферми. Таким образом, для описания мягких мод и фазовых переходов теорию было бы желательно с самого начала согласованно строить в терминах элементарных возбуждений обоих типов — квазичастиц и фононов.

Еще более сложная задача была сформулирована^[118] Н. Бором и все еще далека от решения: «... Проблема структуры ядер не может быть отделена от проблемы выражения законов ядерных сил». Связь свойств сложных ядер «с фундаментальными сильными взаимодействиями остается неясной, о чем свидетельствует и слишком большое число вариантов эффективных феноменологических сил, более или менее эквивалентных в смысле предсказания. Эффекты, связанные с обменными мезонными токами и внутренней структурой нуклонов, изучены до некоторой степени лишь в легких ядрах. Сила подхода Ландау к теории ферми-жидкости состоит в том, что для проблем низкоэнергетической ядерной физики удачно разделены вопросы, связанные с вычислением из первых принципов параметров теории, т.е. эффективного взаимодействия квазичастиц, от задач нахождения наблюдаемых ядерных свойств с помощью этого эффективного взаимодействия. Однако с переходом к более высоким энергиям возбуждения и переданным импульсам неминуемо приходится спивать ядерную физику с законами фундаментальных взаимодействий».

Несмотря на прошедшие десятилетия, еще сохраняют смысл слова Н. Бора: «... В собственно ядерной физике мы находимся только на пороге развития. Глубокая связь экспериментальных и теоретических исследований, отличающая поиски в этой области, дает нам основания для самых больших надежд на дальнейшие успехи»^[4].

3. ДЕЛЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

«Характерный подход Бора к решению проблем состоял в том, что он, подобно Гете, охотно подчинялся «требованию дня» («die Forderung des Tages»), т.е. отвечал на любой представлявший интерес вызов».

Т. Розенфельд (^[179], с. 64)

В последней части статьи обратимся к тому явлению, которое в глазах миллионов людей в первую очередь ассоциируется с ролью ядерной физики в современном мире — к делению атомных ядер. Деление под действием нейтронов было экспериментально обнаружено О. Ганом и Ф. Штрассманом^[119] и сразу же правильно истолковано Л. Мейтнер и О. Фришем^[120] как, в формулировке Н. Бора, «новый

тип расщепления тяжелых ядер, заключающийся в сопровождающемся выделением огромной энергии разделении ядра на две части с приблизительно равными массами и зарядами»^[121].

Основные физические представления о процессе деления предельно ясно изложены в двух кратких заметках Н. Бора^[121,122] и фундаментальной работе Н. Бора и Дж. Уилера^[123]. Хотя за прошедшие с тех пор 45 лет выполнено громадное число «чистых» и «прикладных» исследований различных аспектов физики деления, картина этого процесса и словарь, используемый для ее описания, остались, по существу, теми же, которые были введены Н. Бором. Это отмечалось в книге^[124] и осталось в силе сейчас^[182].

3.1. От компаунд-ядра к делению

Боровскую теорию можно суммировать несколькими утверждениями: а) грубые черты явления описываются классической моделью заряженной жидкой капли, где силы электростатического отталкивания преодолевают короткодействующее ядерное притяжение, ответственное за поверхностную энергию и препятствующее большой деформации ядра; б) процесс носит барьерный характер, чем объясняется «замечательная стабильность тяжелых ядер в основном состоянии или в состояниях с малым возбуждением, хотя при их делении и могла бы выделиться большая энергия»^[121]; в) преодоление барьера требует энергии активации, так как деформационное движение квазиклассично и туннельные квантовые переходы, предсказанные в работе^[123], все же маловероятны (спонтанное подбарьерное деление было открыто Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком позже^[125]); г) высота барьера деления в тяжелых ядрах «имеет тот же порядок величины, что и энергия, достаточная для освобождения отдельной ядерной частицы»^[121], поэтому ²³⁵U делится медленными нейтронами (см. также^[126,127]); д) после внесения энергии возбуждения образуется составное ядро, которое мы подробно обсуждали в гл. 2; время жизни его велико (делительные ширины $\Gamma_f \simeq 0.1$ эВ отвечают $\tau_f \simeq 10^{-14}$ с) и активация деления происходит через те флуктуации, в которых «энергия, распределенная квазиплоским образом, перешла бы в значительной, своей части в некоторый специальный тип колебаний, соответствующий большим деформациям поверхности ядра»^[121]. Исходя из таких представлений, Н. Бор не только объяснил главные черты механизма деления, но и предсказал^[122] резкое различие нечетных и четно-четных изотопов по отношению к делению нейтронами, связанное с тем, что в первом случае энергия возбуждения и плотность уровней составного ядра будут заметно больше вследствие эффектов спаривания. Н. Бор указал также, что из-за флуктуативного характера процесса «продукты деления обладают широким спектром значений масс и зарядов», так что необходимо «внимательное изучение статистического распределения осколков»^[122].

Количественное рассмотрение механизма ядерного деления Н. Бором и Дж. Уилером^[123] и Я.И. Френкелем^[128] основано на понятии

критической деформации, отвечающей точке неустойчивого равновесия ядра (седловая точка, или точка перевала), за которой дальнейшая деформация к двум разделенным фрагментам идет уже с понижением потенциальной энергии. Величина критической деформации в жидкокапельном описании зависит лишь от соотношения кулоновской энергии ($\sim Z^2/R \sim Z^2 A^{-1/3}$) к поверхностной ($\sim R^2 \sim A^{2/3}$), т.е. от параметра делимости Z^2/A и при достижении некоторого предельного значения $(Z^2/A)_c$, равного по современным оценкам 45.5, критическая деформация обращается в нуль, т.е. капля становится неустойчивой по отношению к делению уже при сколь угодно малых деформациях⁹.

Как отметили Н. Бор и Дж. Уилер^[123], «чтобы определить вероятность деления, нет необходимости подробно обсуждать вопрос о том, как именно первоначально сообщенная ядру энергия возбуждения постепенно распределяется по различным степеням свободы и в конце концов приводит к критической деформации». В картине составного ядра, описываемого равновесным тепловым ансамблем при данной энергии возбуждения E , деление определяется плотностью «переходных состояний» $\tilde{\rho}(E - E_f)$, где E_f — та часть энергии возбуждения, которая сконцентрирована на делительной степени свободы ($E_f = U_f + K_f$ есть сумма потенциальной и кинетической энергий деформации, отвечающая упорядоченному движению). Если тепловое равновесие имеет место, то вблизи точки перевала делящаяся система с энергией возбуждения E вблизи порога деления $(U_f)_{\max}$ движется медленно и оказывается почти «холодной» по отношению к внутренним (неделительным) степеням свободы. Эти рассуждения легли позже в основу концепции делительных каналов^[129].

В работе^[123] дано детальное обсуждение имевшихся к тому времени экспериментальных данных по делению тепловыми и быстрыми нейтронами, дейтронами, протонами и фотонами; показано, что испускание запаздывающих нейтронов «следует приписать ядрам в состояниях высокой степени возбуждения, образующимся в результате β -распада осколков деления», рассмотрены два возможных механизма испускания мгновенных нейтронов: их вылет из «шейки» в момент деления или испарение из возбужденных осколков¹⁰ (позднее эксперименты подтвердили, что нейтроны в основном изотропно испаряются из движущихся нагретых осколков); предсказаны качественные эффекты зависимости массовых распределений от энергии возбуждения делящегося ядра. В рамках боровской модели различные наблюдаемые факты «вполне разумно согласуются между собой, давая удовлетворительную картину механизма ядерного деления»^[123].

Последующие 15 лет были годами интенсивного изучения деления и еще более интенсивного его практического использования как в

⁹По теореме, установленной еще Рэлеем, заряженная капля теряет устойчивость при $E_{\text{кул}}/E_{\text{пов}} = 2$.

¹⁰Я. Зельдович и Ю. Зысин вычислили энергию возбуждения осколков и показали неизбежность «испарительных» нейтронов^[181].

мирных, так и в разрушительных целях. Как отмечается в обзоре^[130], круг вопросов, связанных с делением, оказался в значительной степени «изолированным от остальной ядерной физики». Лишь постепенно, до мере общего прогресса в понимании структуры ядра, возрождалось ощущение того, что деление не стоит особняком — оно служит лишь наиболее ярким примером коллективного движения в квантовой системе с сильным взаимодействием. Экспериментальные открытия и развитие теории вновь «вернули физику деления в главное русло» науки^[130].

3.2. От феноменологии к микроскопике

Начало этого процесса условно можно связать с обобщенной моделью^[56], объединившей на микроскопической основе описание одночастичных и коллективных аспектов структуры ядра (гл. 2). В работе Д. Хилла и Дж. Уилера^[131] именно с такой точки зрения была рассмотрена динамика деления. Авторы отмечают, что многочисленным дискуссиям с Н. Бором они обязаны пониманием того, как можно примирить модель жидкой капли с картиной независимых частиц, и что первоначальный вариант статьи был подготовлен в соавторстве с Н. Бором.

Успехи оболочечной модели для основных и слабо возбужденных ядерных состояний позволяют распространить одночастичное рассмотрение на медленное коллективное движение большой амплитуды, каким является деление. Теперь речь идет о зависящем от времени самосогласованном поле (хотя требования самосогласованности в реальных расчетах иногда лишь подразумеваются или выполнены только в грубых чертах), в котором движутся нуклоны. Малость характерных одночастичных времен $\tau_{\text{с.р.}}$ по сравнению с временами деформации обеспечивает адиабатическое приспособление нуклонов к медленно меняющейся форме общего поля, хотя столь резкого деления быстрых и медленных степеней свободы, как в молекулах (благодаря малому отношению массы электронов к массам ядер) здесь нет.

Конкретная динамика коллективного движения большой амплитуды зависит от выбора коллективных переменных — координат Q_i и сопряженных импульсов P_i . Априорного рецепта, определяющего преобразование от исходных нуклонных переменных к коллективным, не существует. Практическим руководящим принципом может служить, кроме макроскопических аналогий, слабость связи коллективных степеней свободы с остальными («внутренними») — лишь в этом случае имеет смысл выделение коллективного движения. Предпочтительнее было бы говорить, как это принято сейчас, о выделении из полного пространства состояний ядра коллективного подпространства, внутри которого динамика целиком выражается через коллективные операторы Q и P , а матричные элементы истинного гамильтониана H и самих коллективных операторов малы для переходов в состояния другой природы^[132]. В пренебрежении связью с

неколлективными степенями свободы можно говорить о консервативном коллективном гамильтониане $H_c(P, Q)$, являющемся отображением на коллективное подпространство многочастичной динамики, управляемой исходным оператором H .

Вид коллективного гамильтониана $H_c(P, Q)$ ограничивается требованиями строгих законов сохранения (T -инвариантность, вращательная симметрия, сохранение пространственной четности). В случае адиабатичности коллективного движения существенны лишь члены с наименьшими степенями коллективных импульсов, т.е.

$$H_c(P, Q) = U(Q) + \frac{1}{2} P_i B_{ij}^{-1}(Q) P_j, \quad (13)$$

коллективный гамильтониан состоит из потенциальной энергии $U(Q)$ и кинетической энергии, квадратичной по импульсам P_i и содержащей массовый тензор $B_{ij}(Q)$, зависящий от коллективных координат.

Основные принципы вычисления слагаемых адиабатического гамильтониана (13) были сформулированы в [131]. Как и в молекулах, потенциальная энергия $U(Q)$ отождествляется с полной энергией замороженной при данных значениях Q конфигурации нуклонов (нуклонные или, точнее, квазичастичные термы). Фиксация Q в простейшем подходе может быть обеспечена введением соответствующего лагранжева множителя аналогично тому, как это делается в модели принудительного вращения^[65] для фиксации в среднем углового момента (гл. 2); эту методику можно усовершенствовать, добываясь самосогласованного воспроизведения численных значений Q во всех точках коллективного пространства^[133–135]. Что касается коллективной кинетической энергии, то она возникает^[71] от неадиабатического смешивания зависящих от Q внутренних волновых функций изменением \dot{Q} коллективных координат. Главным эффектом смешивания является добавление к внутренней функции фазового множителя, градиент которого по нуклонным переменным пропорционален коллективной скорости \dot{Q} , откуда и возникает добавка к полной энергии $\sim \dot{Q}^2$, отождествляемая с кинетической энергией коллективного движения. Такое описание, используемое и в современных подходах^[133,134] к выводу ядерного коллективного гамильтониана, по духу близко к теории макроскопической квантовой когерентности^[136], где гидродинамическая скорость тоже является градиентом фазы макроскопической волновой функции.

Физическим источником фазы является необходимость привести внутреннюю функцию, квантовые числа которой являются адиабатическими инвариантами в соответствии с изменяющимися условиями на поверхности, где (в силу насыщения ядерных сил и слабой сжимаемости ядерного вещества) и сосредоточено коллективное движение. Эти же соображения позволяют утверждать, что внутренняя волновая функция существенно зависит от формы и свойств симметрии среднего поля, так что именно параметры формы естественно, вслед за Н. Бором и Дж. Уилером^[123], принять в задаче деления за коллективные переменные Q_i . Простая связь их с плотностью $\rho(\mathbf{r})$ дает

возможность легко формулировать условия согласования, в то время как когерентность вкладов многих нуклонов гарантирует коллективный характер этих переменных, слабую в среднем чувствительность к изменениям состояний отдельных частиц и относительную медленность коллективного движения. Одной из возможных параметризаций может служить стандартное разложение

$$R(\mathbf{n}) = R_0 \left(1 + \sum_{l,m} Q_{lm}^* Y_{lm}(\mathbf{n}) \right), \quad (14)$$

где для классической «лептодермической» (тонкокожей) капли $R(\mathbf{n})$ есть радиус резкой границы в направлении \mathbf{n} , а в реальной задаче с диффузным краем $R(\mathbf{n})$ описывает форму эквипотенциальных поверхностей.

В представлении (14) коллективное движение разыгрывается в многомерном пространстве переменных $Q_{lm} = (-1)^m Q_{l,-m}^*$. Для несжимаемой жидкой капли динамика содержит лишь вклады Q_{lm} с $l \geq 2$, а в предположении аксиально-симметричных деформаций остаются только слагаемые с $m = 0$ (m — проекция углового момента, связанного с данной модой на ось симметрии). Различные варианты капельной модели, в том числе и с параметризациями, отличными от (14), рисуют примерно одну и ту же карту потенциальной энергии $U_{\text{кап}}(Q)$, учитывающей кулоновское и поверхностное слагаемые, и определяют перевальный путь через этот ландшафт от основного состояния к делению для ядер с разными Z^2/A ^[137]. Капельная модель оказывается стабильной относительно деформаций нечетного порядка (например, Q_{3m}), которые могли бы объяснить наблюдаемую при не слишком больших энергиях возбуждения массовую асимметрию продуктов деления^[138].

3.3. Оболочечные поправки: двугорбые барьеры, изомеры форм и все такое ...

Конечно, даже в макроскопическом описании должны существовать поправки к простейшей капельной модели: нужно учитывать сжимаемость ядерного вещества, различие плотностей нейтронов и протонов, влияние диффузности и локальной кривизны поверхности и т. д.^[139]. По-видимому, однако, суммарный вклад всех этих эффектов в плавно меняющуюся от ядра к ядру потенциальную энергию $U_{\text{кап}}(Q)$ невелик. В то же время для того, чтобы обеспечить согласованное описание внутренних (квазичастичных) переменных при меняющейся форме поля совершенно необходимо учитывать оболочечные эффекты: квазичастицы адиабатически подстраивают свои орбиты к форме поля, и неизбежно возникающая при этом оболочечная структура (см. гл. 1, 2) модулирует энергию «остановленного» ядра. Заполнение деформированных оболочек происходит, вообще говоря, совсем не при тех значениях магических чисел, которые отвечали состояниям ядер вблизи невозмущенных конфигураций среднего

поля. Так, новая четко выраженная картина оболочек, связанная с резонансным вырождением квазипериодических волновых пакетов, возникает^[140] в районе больших деформаций с отношением осей сфероида 2:1.

В первых попытках согласованного учета влияния оболочечных эффектов неопределенности были столь велики, что не позволяли добиться удовлетворительной точности. Прогресс в этом направлении был достигнут после того, как В.М. Струтинскому удалось переформулировать в духе теории ферми-жидкости процедуру вычисления оболочечных поправок^[141], чтобы она явно определялась лишь уровнями квазичастиц близ поверхности Ферми. Именно эти уровни дают при изменении формы быстро меняющиеся вклады в энергию ядра. По Струтинскому оболочечную поправку можно отождествить с разницей полных квазичастичных энергий для двух функций распределения: реального распределения по уровням n_λ с резкой границей Ферми при нулевой температуре и сглаженной функции \bar{n}_λ . Последнюю можно сопоставить, например, с тем размытым распределением Ферми, которое отвечает температуре T , когда оболочечные эффекты исчезают. Процедура сглаживания оказывается не столь чувствительной к точному алгоритму нахождения \bar{n}_λ .

Начиная с работ^[141,142], много усилий было отдано вычислению оболочечных поправок для различных, в том числе гипотетических ядер. Такие расчеты необходимы для планомерного расширения карты нуклидов как в сторону сверхтяжелых ядер, так и к границам области стабильности. Хотя точность расчетов и степень их вариации при изменении вычислительных деталей не вполне ясны с теоретической точки зрения^[143], общественное мнение согласно сейчас, по-видимому, с тем, что можно надеяться на вычисление таким способом оболочечных поправок с точностью $\sim 0.5 - 1.0$ МэВ. Неоднозначности процедуры можно было бы уменьшить, используя современные варианты микроскопической теории конечных ферми-систем (гл. 2), позволяющие теоретически находить и параметры массовой формулы, и квазичастичные вклады. Однако, как уже упоминалось, расчеты здесь пока ограничены сферическими формами среднего поля.

Замечательным фактом, обнаруженным при изучении оболочечных поправок, является двугорбая форма потенциальной энергии как функции параметра продольной деформации. Два минимума потенциальной энергии в тяжелых ядрах отвечают правильно предсказываемой деформации основного состояния и большой деформации (отношение осей около 2), значение которой делает число нейтронов в ядре близким к магическому ($N \simeq 146$); тогда нейтронная оболочечная поправка отрицательна и велика. При этом же числе нейтронов в области внутреннего барьера плотность квазичастичных уровней велика, что дает положительную оболочечную поправку.

Среди многих экспериментальных явлений^[144], укладывающихся в рамки представлений о сложной структуре потенциальных поверхностей ядра, выделяется существование делительных изомеров^[145,146].

Спонтанно делящиеся изомерные состояния, найденные сейчас во многих ядрах (наиболее долгоживущим является изомер ^{242m}Am с временем жизни 14 мс), интерпретируются как квазистационарные состояния, отвечающие значению коллективной деформационной переменной во второй (внешней) яме. Деление отсюда происходит туннельным переходом через внешний барьер паружу. Экспериментальные оценки высот и ширин потенциальных барьеров в целом согласуются с расчетами оболочечных поправок. Соотношение между внешним и внутренним барьерами может быть разным в разных ядрах. Так, по-видимому, в изотопах тория внутренний барьер ниже внешнего, имеющего к тому же тонкую структуру, и заселенное во второй яме состояние успевает протуннелировать с излучением γ -кванта во внутренний стабильный минимум (или в одно из низколежащих коллективных состояний над ним) до того, как произойдет делительный туннельный переход через внешний барьер. В изотопах тория поэтому не наблюдается делящихся изомеров. Параметры же внутренних барьеров слабее меняются с зарядом ядра, за исключением связанного со спариванием понижения в четно-четных ядрах по сравнению с нечетными.

Хорошо известно^[124,138], что при делении тепловыми нейтронами все ядра от тория до эйнштейния дают массовую асимметрию первичных осколков с тяжелым пиком вблизи $A \simeq 142$ и постепенно приближающимся к нему по мере роста A легким пиком. Имеются довольно убедительные свидетельства в пользу того, что это тоже обусловлено оболочечными эффектами. Согласно многим расчетам^[147,148], в актинидах состояния на внешнем барьере обладают ненулевыми нечетными параметрами деформации (Q_{3m} в (14)), т.е. уже на этой стадии процесса равновесная форма отвечает массовой асимметрии. Источником ее является выгодная оболочечная структура деформированного тяжелого фрагмента, которая и фиксирует примерное постоянство его массы. В самых тяжелых ядрах с большим нейтронным избытком начинает прорисовываться еще один пик, связанный с возникновением дважды магического сферического ядра $^{132}_{50}\text{Sn}_{82}$. Сложная картина массовых распределений (оболочечные эффекты дают еще и тонкую структуру) с переходом к симметричному делению при увеличении энергии возбуждения, когда оболочечные и спаривательные поправки ослабевают, говорит о сравнимых вероятностях различных путей к делению в пространстве коллективных переменных (разные «типы деления»). Если оболочечные объяснения вида потенциальных поверхностей правильны, то мы приходим к выводу о том, что в районе седловой точки способ деления уже предопределен. Есть, однако, сложный и неясный вопрос о том, не может ли произойти динамическое изменение симметрии на дальнейшем пути от точки перевала к акту разрыва. Такая идея высказывалась, в частности, Б.Т. Гейликманом^[124].

Динамика медленного коллективного движения от основной конфигурации до седловой точки управляется, кроме потенциальной энергии, еще и кинетической, включающей обобщенный инерциаль-

ный тензор $B_{ij}(Q)$. Действительное классическое движение должно происходить по траектории, удовлетворяющей каноническим уравнениям, порождаемым гамильтонианом (13), а в классически недоступной области — по пути с минимальным действием $\int |P|dQ$. Пока единственным практическим методом вычисления^[71,133] тензора инерции служит адиабатическая теория возмущений, построенная на замороженных внутренних функциях Ψ_{nQ} с фиксированными коллективными координатами Q . Здесь изменение \dot{Q} индуцирует приращение к основной конфигурации Ψ_{0Q} более высоких состояний,

$$B_{ij}(Q) = 2\hbar^2 \sum_{n \neq 0} \frac{\langle \Psi_{0Q} | \partial / \partial Q_i | \Psi_{nQ} \rangle \langle \Psi_{nQ} | \partial / \partial Q_j | \Psi_{0Q} \rangle}{E_n(Q) - E_0(Q)}, \quad (15)$$

$E_n(Q)$ — текущие энергии термов. В квазичастичном приближении для внутренних функций возбужденные конфигурации, вносящие основной вклад в (15), связаны в четно-четных ядрах с разрывом пар или, для заполненных оболочек, с энергией возбуждения порядка расстояния между оболочками. Отсюда вытекает сильная периодическая зависимость массового тензора (15) от коллективных координат и коррелированность его с величиной оболочечных поправок (эффективные массы $B(Q)$ малы вблизи оболочечных минимумов потенциальной энергии). При этом истинная траектория может отличаться от найденной для постоянных инерциальных параметров. Если справедливы предположения (гл. 2) о поверхностном спаривании, то оно будет заметно меняться при делении, модифицируя зависимость (15) от коллективных координат. Этот вопрос еще практически не исследован, а экспериментальные данные противоречивы.

Представления о медленном коллективном движении, слабо связанном с остальными степенями свободы ядра, и об адиабатических нуклонных термах $E_n(Q)$ приводят к выводу, что при энергии возбуждения E , близкой к барьеру деления E_f , почти вся эта энергия сконцентрирована на делительной степени свободы, если координаты Q коллективного движения подошли к седловой точке. На внутренние степени свободы остается очень мало энергии, и они заморожены. Плотность $\tilde{\rho}(E - E_f)$ уровней $E_n(Q)$ в этой области Q мала, как и вблизи нормального основного состояния. Из каждого состояния Ψ_{nQ} ядро может разделиться, и Н. Бор^[129] ввел в соответствии с этим концепцию каналов деления.

3.4. Каналы деления

Квантовые числа отдельных делительных каналов и связанные с ними характеристики продуктов деления (в первую очередь, угловые распределения осколков^[149]) определяются траекторией в коллективном пространстве, ведущей к внешней седловой точке. Если, как это, по-видимому, имеет место в актинидах, ядро здесь аксиально симметрично, то состояния Ψ_{nQ} характеризуются проекцией K момента на ось симметрии. Если, далее, при спуске с барьера и разрыве K не

меняется, то угловое распределение осколков дается плотностью вероятности обнаружить ось симметрии, по которой происходит разлет, направленной в данном направлении \mathbf{n} , т.е. для ядра, имевшего при первоначальном возбуждении угловой момент J и проекцию M на выделенную в эксперименте ось (например, направление падающего пучка частиц), квадратом модуля $|D_{MK}^J(\mathbf{n})|^2$; D — функция Вигнера. Функция D_{MK}^J описывает ротатор фиксированными J и M и с заданной проекцией K момента на жестко связанную с ротатором внутреннюю ось симметрии.

Таким образом, квантовые числа адиабатических состояний вблизи седловой точки формируют угловое распределение фрагментов деления. В частности, если для четно-четного ядра в процессе деформации не происходит разрыв пар, то сохраняется $K = 0$ и распределение осколков пропорционально $|D_{M0}^J(\mathbf{n})|^2 \sim |Y_{JM}(\mathbf{n})|^2$. В фотоделении при не слишком больших энергиях γ -квантов существенны лишь дипольное ($J = 1$) и квадрупольное ($J = 2$) фотопоглощение. При наличии зеркальной симметрии ядра в седловой точке основная вращательная полоса, построенная на этой деформации, имеет лишь четные моменты $0^+, 2^+, \dots$. В таких ядрах у порога деления доминирует квадрупольное фотопоглощение^[146]. При отсутствии зеркальной симметрии вращательная полоса содержит^[152] все моменты $0^+, 1^-, 2^+, \dots$ и основной является дипольная составляющая. Для сравнимых вкладов дипольной и квадрупольной компоненты вследствие их разной четности в угловом распределении возникает интерференционная картина, асимметричная относительно 90° . Именно в этой асимметрии можно пытаться экспериментально искать вклад так называемого прямого деления^[150,151], не проходящего через стадию составного ядра. При усреднении по энергии фотонов в интервале $\Delta E \simeq 100$ кэВ вклад компаунд-состояний в асимметрию оказывается подавленным (ср. аналогичные оценки в гл. 1) в $\sqrt{\Delta E/\Gamma} \simeq 10^3$ раз, где Γ — типичные ширины компаунд-резонансов.

Эксперименты подтверждают интерпретацию угловых распределений, связанную с делительными каналами^[130,146]. В нечетных ядрах квантовое число K при деформации вблизи основного состояния совпадает с проекцией момента Ω неспаренной квазичастицы. С ростом деформации квазичастичные уровни с разными Ω пересекаются, но вследствие сохранения K квазичастица остается на своей орбите, которая перестает быть наименьшей. С этим связана «специфическая» энергия^[152] нечетных делящихся ядер. Из эксперимента можно извлечь сведения об одночастичной и колебательной структуре уровней вблизи седловой точки и внутри второй ямы, где в ряде случаев удастся развить «вторую» спектроскопию^[153]. В частности, наблюдаются вращательные полосы, построенные на втором минимуме, причем величина момента инерции совпадает с ожидающейся для сверхтекучего ядра с большой деформацией. Если порог деления определяется более высоким внутренним барьером, где равновесная форма, вероятно, не обладает аксиальной симметрией, то K

уже не является интегралом движения. Сохранение K нарушается и кориолисовыми силами, но при сравнительно малых моментах J их влияние невелико.

Ядерная спектроскопия квазистационарных состояний в связанных потенциальных ямах дает многообразие физических явлений, отвечающих разным соотношениям параметров ям и, следовательно, разным временам жизни по отношению к туннелированию между ямами, радиационным переходам и делению. Особый интерес представляют случаи, когда плотности уровней при данной энергии в двух ямах существенно различны, так что коллективное движение характеризуется разной степенью связи с некогерентным фоном, дающей разные ширины Γ_{\downarrow} (см. гл. 1) коллективных уровней. Там, где можно разрешить достаточное количество уровней во второй яме, статистическая обработка их показывает^[154] вигнеровскую статистику (4).

Объяснение энергетических зависимостей сечений деления на большей энергетической шкале (десятки МэВ) неизбежно требует обращения к боровской аргументации о составном ядре. Статистическое рассмотрение с помощью принципа детального равновесия, во многом аналогичное задаче об испарении частиц (гл. 1), было сформулировано Н. Бором и Дж. Уилером^[123]. Интересным результатом последнего времени является демонстрация того, что для описания плотности уровней $\tilde{\rho}(E - E_f)$ в седловой точке (именно этой величине пропорциональна делительная ширина $\Gamma_f(E)$) недостаточно одночастичных состояний, даже при учете разрушения спаривания и теплового размытия оболочек. По-видимому, в согласии с идеей Н. Бора и Ф. Калькара^[8] необходим учет вклада в общую плотность уровней коллективных состояний вибрационного и ротационного типа^[156]. Конечно, эти состояния можно представить линейными комбинациями (2) возбуждений частиц и дырок, поэтому они «содержатся» в системе уровней независимых частиц. Но коллективные эффекты существенно понижают энергии когерентных суперпозиций, переводя их совсем в другую область энергий, где в результате плотность уровней заметно растет. Остается открытым вопрос о том, как избежать двойного счета и получить правильную плотность состояний при больших значениях возбуждения.

3.5. Диссипация энергии коллективного движения

До сих пор мы в основном говорили о делении как о чисто коллективном движении по потенциальной поверхности, отвечающей адиабатически меняющейся внутренней структуре. Наименее ясной стороной процесса до сих пор является динамика взаимодействия глобальных коллективных переменных с внутренними степенями свободы, играющими роль термостата или окружающей среды. Этот термостат сравнительно «беден» — в отличие от больших термодинамических систем его интенсивные параметры (например, температура) не могут считаться фиксированными, что все время подчеркивал

Н. Бор^[8]. Наоборот, нас интересует именно большая флуктуация, вымораживающая термостат и передающая почти всю энергию в глобальное движение. Такая флуктуация стремится затухнуть, возвращая систему в равновесное компаунд-состояние. В упоминавшихся в гл. 1 глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов^[50] с энергией в несколько МэВ/нуклон значительная часть кинетической энергии относительного движения испытывает быструю (за времена $\sim 10^{-22}$ с, меньше времени жизни двойной ядерной системы) диссипацию, возбуждая другие степени свободы, в том числе тоже коллективные — деформацию составляющих и разные моды вибраций.

Механизм диссипации при медленном делительном движении в классически доступной области (энергия возбуждения выше барьера) подробно обсуждался в работе Д. Хилла и Дж. Уилера^[131] и фактически хорошо известен из молекулярной физики. Положение адиабатических термов $E_n(Q)$ меняется и при сближении уровней заметными становятся вероятности реальных переходов между ними под действием неадиабатических возмущений. Если при $Q = Q^0$ термы $E_1(Q)$ и $E_2(Q)$ с одинаковыми значениями точных интегралов движения (момент и четность) пересекаются, $E_1(Q^0) = E_2(Q^0)$, то, учитывая в окрестности пересечения недиагональные матричные элементы гамильтониана H_{12} , мы получим расталкивание уровней $E_{\pm}(Q)$ (см. (5)), меняющих характер в области пересечения, например, $E_+(Q < Q^0) \rightarrow E_2(Q)$ и $E_+(Q > Q^0) \rightarrow E_1(Q)$. Переходя к нестационарной задаче с одномерным коллективным движением $Q(t)$, в приближении постоянной в окрестности точки пересечения скорости \dot{Q} можно получить формулу Ландау–Зинера^[157,158]

$$w = \exp\left(-\frac{2\pi}{h} \frac{|H_{12}|^2}{|\dot{Q} d(E_1 - E_2)/dQ|}\right) \quad (16)$$

для вероятности перехода с нижнего на верхний терм при прохождении перекрестка уровней. В отсутствие взаимодействия H_{12} или при очень быстром прохождении области, где это взаимодействие существенно, система, движется по терму $E_1(Q)$, совпадающему с E_- далеко слева, а с E_+ — далеко справа от пересечения, $w \rightarrow 1$. Наоборот, в предельном случае адиабатичности даже при слабом взаимодействии H_{12} время взаимодействия велико, и система успевает плавно перестроить свое состояние, двигаясь все время по нижнему терму ($w \rightarrow 0$), т.е. переходя с $E_1(Q)$ на $E_2(Q)$.

В реальной ядерной ситуации применимость простого результата (16) является скорее исключением, чем правилом. Во-первых, характер перехода между многомерными потенциальными поверхностями может отличаться^[131] от одномерного случая (16). Во-вторых, формула (16) предполагает изолированное пересечение двух термов — процесс, который успевает закончиться (волновые функции выходят на асимптотики) до того момента, как заметным станет взаимодействие с каким-то третьим термом. Это предположение зачастую нарушается. Очевидна аналогия картины пересечений Ландау–Зинера

со столкновениями частиц в разреженном газе: при малой плотности происходят редкие парные встречи и каждое взаимодействие прекращается до начала следующего. Тогда применимо кинетическое уравнение, оперирующее лишь вероятностями элементарных актов. Если столкновения часты, то существенны и фазовые соотношения, полученные в наследство от предыдущих соударений. При наличии нескольких сходящихся путей возможны интерференционные явления. Таким образом, при коллективном движении большой амплитуды возникает сопутствующее движение в пространстве внутренних термов сложной системы. Усреднение по интервалам изменения коллективных координат, включающим несколько столкновений термов, приведет^[159] к случайному процессу броуновского типа.

3.6. Снова о ядерной кинетике

В последние годы успехи вычислительной физики позволили проводить сложные расчеты, описывающие ядерные процессы больших масштабов в методе зависящего от времени среднего поля^[160]. В частности, так рассчитываются столкновения тяжелых ионов^[161]. Отвлекаясь от трудностей этого метода в интерпретации конкретных каналов реакций, отметим, что здесь рассматривается эволюция среднего поля, самосогласованно созданного частицами, заселяющими орбиты в этом поле. При этом в стандартных расчетах по нестационарному методу Хартри–Фока в игру входят лишь те орбиты, которые генетически связаны с состояниями, заполненными в начальный момент. Тем самым отбрасываются примеси детерминантов Слэтера, где частицы находятся на орбитах, происшедших от состояний, первоначально пустых. Здесь недостает того случайного столкновительного элемента, который и создает диссипативную связь глобального движения с некогерентным фоном внутренних возбуждений, приводя к релаксации (термализации) глобальных степеней свободы.

В этом смысле проблемы деления, столкновений тяжелых ионов, ширины гигантских резонансов (гл. 1) или квадрупольного низкоэнергетического движения большой амплитуды (гл. 1) оказываются родственными: во всех случаях желательно было бы заменить уравнение Шрёдингера для коллективных переменных, порожденное гамильтонианом типа (13), уравнением Ланжевена со случайной силой, ответственной за флуктуации и диссипацию коллективного движения. Характеристики случайной силы должны вычисляться микроскопически. Если коллективное движение подвержено лишь броуновскому шуму, связанному с диффузией по энергетическим поверхностям, которые отвечают различным частично-дырочным конфигурациям, то можно ожидать, что процесс будет носить марковский характер и время фазовой памяти не будет заметно превышать типичного времени перескоков. Так как для каждого перескока изменение коллективного движения сравнительно невелико, этот марковский процесс можно свести к уравнению Фоккера–Планка (дрейф к равно-

весному распределению энергии по степеням свободы и диффузия, где коэффициенты должны быть взаимно связаны флуктуационно-диссипативными соотношениями^[162,163]). Феноменологическое введение коэффициентов трения является лишь первым шагом в этом направлении и не может полностью описать, например, пирицы угловых и энергетических распределений в глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов, хотя по порядку величины один и тот же коэффициент вязкости ядерной жидкости требуется для описания диссипативных эффектов в разных ядерных явлениях.

Интересно, что собственно броуновское движение является, строго говоря, немарковским: частица возбуждает слабо затухающие упругие волны в среде, которые действуют на ее последующее движение (вязкое последствие). В ядерном коллективном движении большой амплитуды аналогом этого служит^[163] возбуждение долгоживущих колебательных мод типа гигантских резонансов, построенных на медленно меняющихся значениях глобальных переменных $Q(t)$. Частоты таких мод сильно зависят от формы промежуточных ядерных состояний. Из-за больших кулоновских возмущений в делении, как и в столкновении тяжелых ионов, наиболее вероятно возбуждение низших изовекторных мод, которые могут служить входными состояниями (гл. 2) для процесса релаксации глобального движения. Кроме затухания глобальной энергии, очень важна роль таких вибраций в имеющем место быстром установлении равновесия по отношению Z/A ^[164,165]. Эти процессы включаются в общую схему введением^[166] новых коллективных переменных, описывающих массовые и зарядовые распределения.

3.7. Квантовые эффекты в макроскопических явлениях. Несохрание четности при делении. Необычные редкие распады

Мы видим, что идущая от Н. Бора идея квантового коллективного движения в ядрах лежит в основе нашего понимания деления и объединяет этот процесс с явлениями (гл. 2), не требующими больших отклонений от равновесия. В последние годы интенсивно обсуждаются^[167,168] принципиальные проблемы существования «реально квантовых» макроскопических эффектов. Явления, в которых квантовая когерентность обнаруживается на макроскопических масштабах, хорошо известны (квантованные вихри в сверхтекучей жидкости и в сверхпроводниках, туннельные эффекты Джозефсона в слабых сверхпроводящих контактах и т. д.). Здесь же речь идет о другом: грубо говоря, является ли, например, квантовым движение центра масс колеблющегося макроскопического маятника, состоящего из огромного числа атомов? В определенном смысле ядерное деление как раз и дает пример такого реально квантового процесса (туннелирование по коллективной координате, т.е. согласованное прохождение двухсот нуклонов через классически запрещенную область). Как следует из результатов^[167], связь с неколлективными степеня-

ми свободы должна понижать вероятность таких чисто квантовых коллективных событий. Эти вопросы исследованы еще очень плохо.

Не так давно было обнаружено^[169] уникальное проявление фундаментальных квантовых закономерностей в делении — несохранение пространственной четности. Направление преимущественного вылета легких осколков при делении медленными поляризованными нейтронами оказывается коррелированным с направлением спина нейтронов. Согласно теории, изложенной в^[150], смешивание состояний противоположной четности слабым взаимодействием наиболее эффективно на «горячей» стадии компаунд-ядра, где высока плотность уровней и работает фактор динамического усиления (11), пропорциональный $\sqrt{\Gamma_{\downarrow}/D} \sim 10^3$ и приводящий к эффектам порядка 10^{-4} вместо 10^{-7} , что следовало бы ожидать, исходя из констант слабого взаимодействия. Здесь речь идет о возбуждении ядра после захвата монохроматических нейтронов (энергетический разброс ΔE мал по сравнению с ширинами резонансов Γ , а $\Gamma < D$). Поэтому мы имеем дело с определенной, хотя и очень сложной волновой функцией квазистационарного состояния. Раскладывая эту функцию по делительным каналам, т.е. по базису переходных состояний около седловой точки, мы получаем смешивание того же порядка $\sim 10^{-4}$ для наименее (вращательных) состояний противоположной четности, характерных для зеркально асимметричного (грушевидного) ротатора, каким является делящееся ядро при седловой деформации. Делительные каналы, как мы уже обсуждали, формируют угловые и массовые распределения осколков, несущие наблюдаемую информацию о несохранении четности. Таким образом, в механике этого процесса аккумулированы основные идеи боровской теории деления: составное ядро с высокой плотностью уровней сложной природы, движение по коллективной переменной, концентрация энергии на делительной степени свободы. Результатом является «реально квантовое» макроскопическое движение, как бы вопреки второму началу термодинамики усиливающее слабые детали элементарных взаимодействий.

Одной из интересных нерешенных проблем в физике деления представляется соотношение боровского жидкокапельного механизма и кластерных процессов типа α -распада. Открытие радиоактивных распадов изотопов радия $^{222,223,224}\text{Ra}$ с вылетом ядра ^{14}C ^[170,171,180] показывает, что и здесь наблюдаемая реакция управляется оболочечными закономерностями (продуктом распада является магическое ядро свинца). Не исключено, что вероятность испускания ^{14}C усилена октупольной деформацией основного состояния, по-видимому, существующей в изотопах Ra^[61] (иначе говоря, в плане ответа на вопрос о составных частях ядер, грушевидная деформация и создается компонентой волновой функции с избыточным кластером ^{14}C сверх дважды магического остова), так что процесс задержан лишь пониженной примерно на 10 порядков по сравнению с α -распадом проницаемостью барьера. Существуют попытки^[172] полностью объяснить деление механизмом диффузионного роста первоначально возникше-

го кластерного квазимолекулярного состояния. Изучение перехода от глубоконепругих передач в столкновениях тяжелых ионов к полному слиянию в составное ядро указывает, что здесь диффузионный путь последовательного перехода нуклонов может быть весьма существенным^[50]. В квазимолекулярной гипотезе α -распад или ^{14}C -радиоактивность были бы лишь предельными случаями сверхасимметричного деления. Поскольку в принципе оба способа деления возможны, речь идет фактически о сравнении вероятностей «жидкокапельных» и «кластерных» флуктуаций. Совокупность данных по обычному делению (зависимость от капельного параметра Z^2/A , массовые и угловые распределения, согласованность данных по делению нейтронами и фотонами, эксперименты по несохранению четности и т. д.) целиком укладывается в боровскую интерпретацию. Что касается радиоактивности с вылетом тяжелых кластеров, где механизм мог бы быть иным, то этот вопрос может быть решен по мере накопления экспериментальных данных о зарядовых и энергетических зависимостях вероятностей этих «экзотических» распадов^[173].

Упомянем в заключение, что новый круг проблем открывается с переходом в область высоких энергий возбуждения: сохраняется ли капельная картина с доминирующей ролью параметра Z^2/A ; как меняются барьеры деления и плотности уровней ядер; успевают ли образоваться составное ядро, не зависящее от способа возбуждения; что нового дают открывающиеся каналы с рождением мезонов и нуклонных резонансов и т. д. Особенно интересным представляется изучение деления средних ядер, где существующие данные противоречивы^[174].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Во всей мировой науке в наши дни не было человека с таким влиянием на естествознание, как Бор. Из всех теоретических троп тропа Бора была самой значительной».

П.Л. Капица^[183]

Мы подошли к концу нашего затянувшегося обзора. Мы совсем не остановились на многих сторонах научного наследия Н. Бора, имеющих прямое отношение к ядерной физике. Полностью вне поля зрения остался цикл работ, посвященных прохождению ядерных частиц через вещество. Не затронуты также фундаментальные исследования философии научного познания и глубоких основ квантовой теории, которые можно было бы проиллюстрировать поучительными примерами из современной физики ядра. Мы обсудили лишь развитие идей Н. Бора, относящихся собственно к ядерной структуре и являющихся актуальными сейчас: концепцию составного ядра и статистического описания, коллективное движение и ядерное деление как феномен, понимание которого основано на синтезе идей предыдущих разделов.

Мы видели, что живая мысль Н. Бора оплодотворила физику ядра и дала ей мощный импульс, влияние которого не иссякло и сейчас.

Нет сомнений в пользе изучения работ основателей современной физики и проникновения в стиль их мышления, подхода к проблемам. Недаром П. Эренфест писал, имея в виду Н. Бора и А. Эйнштейна: «... Для них новые вещи являются необходимостью потому, что они хорошо знают старое и отчетливо видят невозможность старого, классического объяснения». Конечно, некоторые конкретные места в работах Н. Бора кажутся сейчас устаревшими. Но, как подчеркивал сам Н. Бор, говоря о заслугах Дж. Максвелла, наибольшую ценность представляют «основные понятия физики, которым мы обязаны великим учителям»^[175]. Можно вполне согласиться с формулировкой Н. Бора, данной в этой же работе: «... Максимум того, что может дать какая бы то ни было теория», это, кроме истолкования наблюдаемых явлений, то, что она «способствовала различным гипотезам и управляла развитием за пределами ее первоначальной применимости».

Сейчас, когда редакции многих научных журналов озабочены, кажется, больше всего экономией своих страниц, статьи Н. Бора могут показаться перегруженными и «чересчур убедительными». Признавая большое влияние датского философа С. Кьеркегора на формирование своего мировоззрения, Н. Бор отнюдь не следовал его принципу «Гении не нуждаются в доводах». Снова и снова Н. Бор, имея все время перед глазами предполагаемого читателя и оппонента, рассматривает предмет работы с разных сторон, обновляет и уточняет аргументацию, стараясь предвидеть возражения и донести оттенки своей глубоко диалектической мысли, неустанно ищущей истину. Известное высказывание Н. Бора «о двух родах истины»^[176] освещает его отношение к науке и к внутреннему миру настоящего ученого: «К одному роду истин относятся такие простые и ясные утверждения, что противоположные им очевидно не верны. Другой род, так называемые «глубокие истины», представляют, наоборот, такие утверждения, что противоположные им тоже содержат глубокую истину. Развитие в новой области обычно идет этапами, причем хаос постоянно превращается в порядок: но, пожалуй, как раз на промежуточном этапе, где преобладают «глубокие истины», работа особенно полна напряженного интереса и побуждает фантазию к поискам твердой опоры».

Именно так развивались идеи в области структуры атомных ядер. Одночастичное и коллективное движение — два взаимодействующих аспекта ядерной структуры — воплощают две глубоких истины по отношению к природе, происходящих в недрах ядра. Движение нуклонов и кластеров, в свою очередь, соответствует коллективным аспектам кварковой физики, специфически «по-ядерному», подчеркивающей эффекты фундаментальных взаимодействий. Эта область представляется главной ареной экспериментальных и теоретических исследований следующего поколения.

Вспоминая о своем учителе Э. Резерфорде как «об основоположнике науки о ядре»^[177], Н. Бор писал: «Для новых поколений, которым в грядущие годы суждено продолжать изучение атомного мира, жизнь и деятельность этого великого исследователя всегда будет служить источником вдохновения». С полным правом мы можем отнести эти слова и к самому Нильсу Бору.

Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова
Институт ядерной физики
СО АН СССР, Новосибирск

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohr N. — *Naturwissenschaften*, 1930, Bd. 18, S. 73; перевод (см. пояснение в конце Введения): с. 62.
2. Bohr N. — *Nature*, Suppl., 1926, v. 118, p. 51; перевод: с. 26.
3. Bohr N. — *J. Chem. Soc.*, 1932, v. 134, p. 349; перевод: с. 75.
4. Bohr N. — *Ann. d. Phys.*, 1938, Bd. 32, S. 5; перевод: с. 259.
5. Bohr N. — *Nature*, 1936, v. 137, p. 344; перевод: с. 192.
6. Friedman F., Weisskopf V. — In: *Niels Bohr and the Development of Physics*. — Lnd.: Pergamon Press, 1955; перевод: Нильс Бор и развитие физики. — М.: ИЛ, 1958, с. 177.
7. Amaldi E. — *Phys. Rept.*, 1984, v. 111, p. 1.
8. Bohr N., Kalckar F. — *Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd.* 1937, v. 14, p. 10; перевод: с. 213.
9. Breit G., Wigner E. — *Phys. Rev.*, 1936, v. 49, p. 519, 642; Bethe H. *Phys. Rev.*, 1936, v. 50, p. 332; *Rev. Mod. Phys.*, 1937, v. 9, p. 69.
10. Френкель Я.И. — *Sov. Phys.*, 1936, v. 9, p. 533.
11. Ландау Л.Д. — *Phys. Zs. Sowjetunion*, 1937, Bd. 11, S. 556.
12. Weisskopf V.F. — *Phys. Rev.*, 1937, v. 52, p. 295.
13. Bohr N., Peierls R., Placzek G. — *Nature*, 1939, v. 144, p. 200; перевод: с. 295.
14. Weisskopf V.F. — *Helv. Phys. Acta*, 1950, v. 23, p. 187.
15. Feshbach H., Porter C.E., Weisskopf V. — *Phys. Rev.*, 1953, v. 90, p. 166.
16. Немировский П.Э. *Современные модели атомного ядра*. — М.: Атомиздат, 1960.
17. Bohr A., Mottelson B. *Nuclear Structure. V. I* — Reading, MA: W.A. Benjamin, 1969. перевод: Бор О., Моттelson Б. *Структура атомного ядра, т. 1*. — М.: Мир, 1971.
18. Brody T.A. et al. — *Rev. Mod. Phys.*, 1981, v. 53, p. 385.
19. Wigner E.P. — *Ann. Math.*, 1951, v. 53, p. 36; 1955, v. 62, p. 248.
20. Von Neumann J., Wigner E.P. — *Phys. Zs.*, 1929, Bd. 30, S. 467.
21. Gurevich I.I., Pevsner M.I. — *Nucl. Phys.*, 1957, v. 2, p. 575.

22. Dyson F.J. — *J. Math. Phys.*, 1962, v. 3, p. 140, 157, 166; перевод: Дайсон Ф. Статистическая теория энергетических уровней сложных систем. — М.: ИЛ, 1963. Mehta M.L. *Random Matrices and the Statistical Theory of Energy Levels*. — N.Y.: Academic Press, 1967.
23. Гуревич И.И. — *ЖЭТФ*, 1939, т. 9, с. 1283.
24. Chiricov B.V. — *Phys. Rept.*, 1979, v. 52, p. 263.
25. Zaslavsky G.M. — *Ibidem*, 1981, v. 80, p. 157.
26. Chiricov B.V., Izrailev F.M., Shepelyansky D.L. — *Sov. Sci. Rev. Sect. C*, 1981, v. 2, p. 209.
27. Berry M.V. — *Ann. Phys. (N.Y.)*, 1981, v. 131, p. 163.
28. Bohigas O. et al. — *Phys. Rev. Lett.*, 1984, v. 52, p. 1.
29. Струтинский В.М., Магнер А.Г. — В кн.: *Материалы X Зимней школы ЛИЯФ*. — Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1975, ч. I, с. 251.
30. Pechukas P. — *Phys. Rev. Lett.*, 1983, v. 51, p. 943.
31. Татарский В.И. — *УФН*, 1983, т. 139, с. 587.
32. Porter C.E., Thomas R.G. — *Phys. Rev.*, 1956, v. 104, p. 483.
33. Draayer J.P., French J.B., Wong S.S.M. — *Ann. Phys.*, 1977, v. 106, p. 472, 503.
34. Flambaum V.V., Sushkov O.P. — *Nucl. Phys. Ser. A*, 1984, v. 412, p. 13.
35. Сушков О.П., Фламбаум В.В. — *ЯФ*, 1981, т. 33, с. 59.
36. Blin-Stoyle R.J. — *Phys. Rev.*, 1960, v. 120, p. 181.
37. Шапиро И.С. — *УФН*, 1968, т. 95, с. 647.
38. Ericson T. — *Ann. Phys. (N.Y.)*, 1963, v. 23, p. 390.
39. Фейнберг Е.Л. — В кн.: *Труды проблемного симпозиума по физике ядра*. Тбилиси, 1967. — М.: ИТЭФ, 1967, т. 2, с. 389.
40. Базь А.И. — В кн.: *Материалы XIII Зимней школы ЛИЯФ*. — Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1978, с. 5.
41. Ольховский В.С. — *Физ. ЭЧАЯ*, 1984, т. 15, с. 288.
42. Agassi D., Weidenmuller H.A., Mantzouranis G. — *Phys. Rept. Ser. C*, 1975, v. 22, p. 145.
43. Feshbach H., Kerman A.L., Koonin S. — *Ann. Phys. (N.Y.)*, 1980, v. 125, p. 429.
44. Живописцев Ф., Сухаревский В.Г. — *Физ. ЭЧАЯ*, 1984, т. 15, с. 1208.
45. Румянцев Б.А., Хейфец С.А. — *ЯФ*, 1975, т. 21, с. 510.
46. Friedman W.A. et al. — *Phys. Rept.*, 1981, v. 77, p. 47.
47. McVoy K.W., Tang X.T. — *Ibidem*, 1983, v. 94, p. 139.
48. Зайдель К. и др. — *Физ. ЭЧАЯ*, 1976, т. 7, с. 499.
49. Griffin J.J. — *Phys. Rev. Lett.*, 1966, v. 17, p. 478; *Phys. Lett. Ser. B*, 1967, v. 24, p. 5.
50. Волков В.В. *Ядерные реакции глубокоэластичных передач*. — М.: Энергоиздат, 1982.
51. Bohr N. *The Unity of Knowledge*. — N.Y.: Doubleday and Co., 1955, p. 17; перевод: с. 481.
52. Bohr A., Mottelson B. *Nuclear Structure. V. II*. — N.Y.: Benjamin, 1974; перевод: Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. т. 2. — М.: Мир, 1977.
53. Mayer M.G. — *Phys. Rev.*, 1950, v. 78, p. 16, 22.
54. Rainwater J. — *Ibidem*, v. 79, p. 432.
55. Bohr A. — *Ibidem*, 1950, v. 81, p. 134.
56. Bohr A., Mottelson B. — *Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd.*, 1953, v. 27, No. 16; перевод: *Пробл. совр. физ.*, 1955, No. 9, с. 34.
57. Bohr N. — *Nature*, 1938, v. 141, p. 1096.
58. Bohr A. — *Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd.*, 1952, v. 26, p. 14; перевод как в [56], с. 9.
59. Belyaev S.T., Zelevinsky V.G. — *Nucl. Phys.*, 1962, v. 39, p. 582.
60. Hamamoto I., Mottelson B.R. — *Phys. Lett. Ser. B*, 1983, v. 132, p. 7.
61. Leander G.A. et al. — *Nucl. Phys. Ser. A*, 1983, v. 388, p. 425.
62. Bohr A. *Rotational States of Atomic Nuclei*. — Copenhagen: Munksgaard, 1954; перевод как в [56], 1956, No. 9, с. 5.
63. Alaga G. et al. — *Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd.*, 1955, v. 29, No. 9; перевод: *ibidem*, с. 80.
64. Bohr A., Mottelson B. — *Ibidem*, v. 30, No. 1; перевод: *ibidem*, с. 173.
65. Inglis D.R. — *Phys. Rev.*, 1956, v. 103, p. 786.
66. Беляев С.Т., Зелевинский В.Г. — *ЯФ*, 1970, т. 11, с. 741.
67. Rockmore R.M. — *Phys. Rev.*, 1960, v. 118, p. 1645.
68. Bohr N. *Studier over metallernes elektrontheori*. — Kobenhavn: Thaning og Appel, 1911.
69. Van Leuwen H.J. — *Phys. et Radium*, 1921, t. 2, p. 361.
70. Bohr A., Mottelson B., Pines D. — *Phys. Rev.*, 1958, v. 110, p. 936.
71. Belyaev S.T. — *Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd.*, 1959, v. 31, No. 11.
72. Соловьев В.Г. *Влияние парных корреляций сверхпроводящего типа на свойства атомных ядер*. — М.: Атомиздат, 1963.
73. Ландау Л.Д. — *ЖЭТФ*, 1956, т. 30, 1058; 1957, т. 32, с. 59.
74. Вакс В.Г., Галицкий В.М., Ларкин А.И. — *ЖЭТФ*, 1961, т. 41, с. 1655.
75. Саперштейн Э.Е., Фаянс С.А., Ходель В.А. — *Физ. ЭЧАЯ*, 1978, т. 9, с. 221.
76. Gneuss G., Greiner W. — *Nucl. Phys. Ser. A*, 1971, v. 171, p. 449.
77. Зелевинский В.Г. — *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1984, т. 48, с. 79; 1985, т. 49, с. 65.
78. Воров О.К., Зелевинский В.Г. — *ЯФ*, 1983, т. 37, с. 1392.
79. Janssen D., Jolos R.V., Donau F. — *Nucl. Phys. Ser. A*, 1974, v. 224, p. 93.
80. Arima A., Iachello F. — *Ann. d. Phys.*, 1976, Bd. 99, S. 253; 1978, Bd. 111, S. 201; 1979, Bd. 123, S. 468.

81. Лемберг И.Х., Михайлов В.М. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1982, т. 46, с. 2170.
82. Speth J., van der Woude A. — Rept. Progr. Phys., 1981, v. 44, p. 719.
83. Урин М.Г. — Физ. ЭЧАЯ, 1984, т. 15, с. 245.
84. Bergere R. — In: Lecture Notes in Physics. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1977, v. 61, p. 1.
85. Bothe W., Gentner W. — Zs. Phys., 1939, Bd. 112, S. 45.
86. Bohr N. — Nature, 1938, v. 141, p. 326; перевод: с. 274.
87. Auerbach N. et al. — Rev. Mod. Phys., 1972, v. 44, p. 48.
88. Migdal A.B. — J. Phys. USSR, 1944, v. 8, p. 331.
89. Hansen P.G. — Adv. Nucl. Phys., 1973, v. 7, p. 159.
90. Гапонов Ю.В., Лютостанский Ю.С. — Физ. ЭЧАЯ, 1981, т. 12, с. 1324.
91. Пятов Н.И., Фаянс С.А. — Ibidem, 1983, т. 14, с. 953.
92. Migdal A.B. — Rev. Mod. Phys., 1978, v. 50, p. 107.
93. Moniz E. — Nucl. Phys. Ser. A, 1982, v. 374, p. 557.
94. Румянцев Б.А. — ЯФ, 1972, т. 15, с. 46.
95. Беляев С.Т., Зелевинский В.Г. — ЯФ, 1973, т. 17, с. 525.
96. Зелевинский В.Г., Штокман М.И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1972, т. 36, с. 2577.
97. Newton J.O. et al. — Nucl. Phys. Ser. A, 1970, v. 141, p. 631.
98. De Voigt M.J.A. et al. — Rev. Mod. Phys., 1983, v. 55, p. 949.
99. Павличенков И.М. — УФН, 1981, т. 133, с. 193.
100. Mottelson B.R., Valatin J.G. — Phys. Rev. Lett., 1960, v. 5, p. 511.
101. Гринь Ю.Т., Ларкин А.И. — ЯФ, 1965, т. 2, с. 40.
102. Johnson A., Ryde H., Sztarkier J. — Phys. Lett., Ser. B, 1971, v. 34, p. 605.
103. Sorensen R.A. — Rev. Mod. Phys., 1973, v. 45, p. 353.
104. Garrett J.D. — Nucl. Phys. Ser. A, 1983, v. 409, p. 259.
105. Stephens P. — Rev. Mod. Phys., 1975, v. 47, p. 43.
106. Bengtsson R., Frauendorf S. — Nucl. Phys. Ser. A, 1979, v. 314, p. 27; v. 327, p. 139.
107. Bengtsson R. et al. — Ibidem, 1983, v. 405, p. 221.
108. Bohr A., Mottelson B.R. — J. Phys. Soc. Japan Suppl., 1978, v. 44, p. 157.
109. Pedersen J. et al. — Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 990.
110. Cohen S., Plasil F., Swiatecki W.J. — Ann. Phys. (N.Y.), 1974, v. 82, p. 557.
111. Галицкий В.М., Мигдал А.В. — ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 139.
112. Мигдал А.В. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. — М.: Наука, 1965; 2-е изд., 1982.
113. Khodcl V.A., Saperstein E.E. — Phys. Rept., 1982, v. 92, p. 183.
114. Саперштейн Э.Е., Ходель В.А. — ЖЭТФ, 1981, т. 81, с. 22.
115. Беляев С.Т. — ЯФ, 1965, т. 1, с. 3.

116. Беляев С.Т., Зелевинский В.Г. — ЯФ, 1965, т. 1, с. 13; 1965, т. 2, с. 51.
117. Беляев С.Т., Зелевинский В.Г. — Ibidem, с. 615.
118. Bohr N. Congres du Palais de la decouverte. — Paris, 1938; перевод: с. 272.
119. Hahn O., Strassman F. — Naturwissenschaften, 1939, Bd. 27, S. 11.
120. Meitner L., Frisch O. — Nature, 1939, v. 143, p. 239.
121. B o h r N.— Ibidem, p. 330; перевод: с. 289.
122. Bohr N.— Phys. Rev., 1939, v. 55, p. 418; перевод: с. 291.
123. Bohr N., Wheeler J.A. — Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 426; перевод: с. 299.
124. Халперн И. Деление ядер. — М.: ИЛ, 1962.
125. Петржак К.А., Флеров Г.Н. — ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 1013; УФН, 1961, т. 73 с. 655.
126. Bohr N., Wheeler J.A. — Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 1065; перевод: с. 350.
127. Bohr N. — Ibidem, 1941, v. 59, p. 1042; перевод: с. 374.
128. Френкель Я.И. — ЖЭТФ, 1939, т. 9, с. 641.
129. Бор О. — В кн.: Труды международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. — М.: Физматгиз, 1958, т. 2, с. 175.
130. Grant I.S. — Rept. Progr. Phys., 1976, v. 39, p. 955.
131. Hill D.L., Wheeler J.A. — Phys. Rev., 1953, v. 89, p. 1102.
132. Беляев С.Т., Зелевинский В.Г. — ЯФ, 1972, т. 16, с. 1195.
133. Belyaev S.T. — Nucl. Phys., 1965, v. 64, p. 17.
134. Zelevinsky V.G. — Nucl. Phys. Ser. A, 1980, v. 337, p. 40.
135. Baranger M., Veneroni M. — Ann. Phys. (N.Y.), 1978, v. 114, p. 123.
136. Anderson P.W. — Rev. Mod. Phys., 1966, v. 38, p. 298.
137. Cohen S., Swiatecki W.J. — Ann. Phys. (N.Y.), 1963, v. 22, p. 406.
138. Plutonium Project. — Rev. Mod. Phys., 1946, v. 18, p. 539.
139. Myers W.D., Swiatecki W.J. — Ann. Phys. (N.Y.), 1970, v. 55, p. 395.
140. Nix J.R. — Ann. Rev. Nucl. Sci., 1972, v. 22, p. 65.
141. Strutinsky V.M. — Nucl. Phys. Ser. A, 1967, v. 95, p. 420; 1968, v. 122, p. 1.
142. Brack M. et al. — Rev. Mod. Phys., 1972, v. 44, p. 320.
143. Гречухин Д.П., Пик-Пичак Г.А. Препринт ИАЭ-2115. — Москва, 1971.
144. Bjornholm S., Lynn J.E. — Rev. Mod. Phys., 1980, v. 52, p. 75.
145. Поликапов С.М. и др. — ЖЭТФ, 1962, т. 15, с. 1016.
146. Ципепок Ю.М. и др. — УФН, 1984, т. 144, с. 3.
147. Pashkevich V.V. — Nucl. Phys. Ser. A, 1971, v. 169, p. 275.
148. Moller P., Nix R. — Nucl. Phys. Ser. A, 1974, v. 229, p. 269.
149. Струтинский В.М. — ЖЭТФ, 1956, т. 30, с. 603; 1960, т. 39, с. 781.
150. Сунков О.П., Фламбаум В.В. — УФН, 1982, т. 136, с. 3.
151. Фламбаум В.В. Препринт ИЯФ СО АН СССР No. 84-119. — Новосибирск, 1984.

152. Wheeler J. — In ^[6]; перевод как в ^[6], с. 214.
153. Specht H.J. — Rev. Mod. Phys., 1974, v. 46, p. 773.
154. Glassel P., Rosler H., Specht H.J. — Nucl. Phys. Ser. A, 1975, v. 256, p. 220.
155. Ericson T. — Adv. Phys., 1960, v. 9, p. 425.
156. Вдовин А.И. и др. — Физ. ЭЧАЯ, 1976, т. 7, с. 952.
157. Landau L. — Phys. Zs. Sowjetunion, 1932, Bd. 1, S. 88; Bd. 2, S. 46.
158. Zener C. — Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1932, v. 137, p. 696.
159. Wilets L. — Phys. Rev., 1959, v. 116, p. 372.
160. Negele J.W. — Rev. Mod. Phys., 1982, v. 54, p. 913.
161. Flocard H. et al. — Nucl. Phys. Ser. A, 1980, v. 339, p. 336.
162. Hofmann H., Siemens P.J. — Nucl. Phys. Ser. A, 1976, v. 257, p. 165; 1977, v. 275, p. 164.
163. Зелевинский В.Г. — В кн.: Материалы XII Зимней школы ЛИЯФ. — Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1977, с. 53.
164. Hofmann H. et al. — Zs. Phys. Ser. A, 1979, Bd. 293, S. 229.
165. Исаев П.Н. — ЯФ, 1981, т. 34, с. 1207.
166. Yamaji S. et al. — Zs. Phys. Ser. A, 1976, Bd. 278, S. 69.
167. Caldeira A.O., Legett A.J. — Ann. Phys. (N.Y.), 1983, v. 149, p. 374.
168. Лихарев К.К. — УФН, 1983, т. 139, с. 169.
169. Данилян Г.В. и др. — Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 197.
170. Rose H.J., Jones G.A. — Nature, 1984, v. 307, p. 245.
171. Price P.B. et al. — Phys. Rev. Lett., 1985, v. 54, p. 297.
172. Шигин В.А. — ЯФ, 1978, т. 27, с. 67.
173. Roenaru D.N. et al. — J. Phys. Ser. G, 1984, v. 10, p. L183.
174. Vaishnene L.A. et al. — Zs. Phys., 1981, Bd. 302, S. 143.
175. Bohr N. — Nature, 1931, v. 128, p. 691; перевод: с. 72.
176. Bohr N. — In: Albert Einstein — Philosopher-Scientist. — Evanston, 1949; перевод: с. 432.
177. Bohr N. — Proc. Phys. Soc., 1961, v. 78, p. 1083; перевод: с. 545; то же: УФН, 1963, т. 80, с. 250¹¹.
178. Слив Л.А., Стрикман М.И., Франкфурт Л.Л. — УФН, 1985, т. 145, с. 553.
179. Нильс Бор. Жизнь и творчество: Сборник статей. — М.: Наука, 1967.
180. Александров Д.В. и др. — Письма ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 152.
181. Зельдович Я., Зысин Ю. — ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 831.
182. Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. — УФН, 1983, т. 139, с. 501.
183. Кашица П.Л. — Природа, 1963, No. 1, с. 67.

¹¹В июньском номере УФН за 1963 г. (т. 80, вып. 2) опубликованы также статьи, посвященные памяти Н. Бора. (*Прим. ред.*)

Воспоминания

Недолгая, но яркая жизнь

С.Т. Беляев. — В кн.: Академик Г.И. Будкер. Очерки. Воспоминания. Новосибирск: Наука, 1988, с. 61–67.

Андрей Михайлович Будкер — фигура в нашей науке уникальная. Оригинальный самородок, ученый, явно не вписывающийся в ряд признанных научных направлений и школ, он прожил недолгую, но яркую жизнь и оставил в науке много основополагающих идей и результатов.

Так или примерно так пишут и будут писать о Будкере историки науки, и это абсолютная правда. Но для тех, кто работал с ним, кто знал его и в суматошных работах буднях и житейских передрыгах, Андрей Михайлович (или просто А.М.) прежде всего оригинальная и свособразная личность. Иных его пестрота и многозначность опарашивала своей неканоничностью. Симбиоз мудреца и активнореального человека с чертами наивно-суетного местечкового провинциала. Глубокая внутренняя совесть и порядочность соседствовали с хитрецей балаганного фокусника. Но кто знает, может быть, без этой сложности и непричесанности не было бы у А.М. и его оригинального и парадоксального мышления. Яркие таланты нередко сопровождаются причудами характера. И как часто последнее перевешивает в общественном мнении, всячески затрудняя проявление самого таланта. Поэтому гладкая иконопись в галерее выдающихся ученых вредна и неуместна. Жизнь А.М. Будкера интересна и поучительна также и с этой стороны.

Я близко знал А.М. почти тридцать лет, с конца 40-х годов до его кончины. В памяти моей много эпизодов и картин. Постараюсь воспроизвести некоторые. 1949 год. Я — студент четвертого курса МФТИ и большую часть времени провожу на практике в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ныне Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова) в теоретическом секторе А.Б. Мигдала. Сектор небольшой, но состав очень яркий. Среди сотрудников — Б.Т. Гейликман, В.М. Галицкий, А.М. Будкер. Решение важных практических задач сочетается с фундаментальными исследованиями. Обстановка очень демократичная, дискуссии свободны и часто проходят слишком горячо, выявляя индивидуальные темпераменты: рафинированную интеллигентность и неизменную корректность — Б.Т. Гейликмана, те же качества, но лишь до некоторого предела возбудимости — у В.М. Галицкого, мощную, темпераментную самоуверенность — А.Б. Мигдала. Отношение к А.М. Будкеру как к талантливому, но очень невоспитанному ребенку. Он постоянно вторгается в дискуссии даже по новым для него проблемам, пытаясь перехватить инициативу. «Андрей, лучше почитайте об этом сами», — это Гейликман. «Андрей, я тебе потом это объясню», — это Галицкий. «Андрей, Вы узнали об этом только полчаса назад,

Неужели Вы считаете, что в состоянии чему-либо научить меня в проблеме, которой я занимаюсь многие годы!» — это Мигдал. Иногда взрыв более сильный. Вот сценка. Мигдал занят вычислениями, а Будкер рядом дает советы: «Сделайте подстановку $1/x$!». Мигдал, наконец, взрывается: «Андрей, идите вон!» — «Ну, Кадя, сделайте подстановку $1/x$!». Мигдал хватается за Будкера в охапку, выносит за дверь и запирается на ключ. Будкер кричит в замочную скважину: «Сделайте подстановку $1/x$!»

У Будкера полно идей и вне физики. Иногда очень экзотических, от оригинальной структуры организации колхозного производства до «теории лунно-менструального цикла». И все это время он был серьезно погружен в решение важных конкретных задач реакторной и ускорительной физики. Вообще в теоретической физике его больше привлекали конкретные практические задачи, хотя он любил хвастаться некоторыми абстрактными результатами. С гордостью повторял, что самостоятельно разобрался в топологии асимптотических особенностей уравнений в комплексной плоскости (линий Стокса).

Когда пришел срок моей дипломной работы, Мигдал «отдал» меня Будкеру («... у него всегда есть практические задачи»). В то время меня больше влекли сложные квантовые проблемы, а не то, что сформулировал Будкер: «На нашем циклотроне что-то неладно. Большие потери пучка на первых оборотах. Может быть удастся разобраться в траекториях частиц и помочь экспериментаторам». Я начал разбираться, появились кое-какие идеи. Будкер пару раз заинтересовался, как идут дела, посмотрел на мои математические «красивости» (вычисление поля между дуантами с помощью конформных преобразований и т.д.) и, убедившись, что диплом будет, потерял ко мне интерес и предоставил полную самостоятельность.

После защиты диплома и месячного отпуска я пришел (в феврале 1952 года) в сектор Мигдала уже как постоянный сотрудник. И попал в новую авральную обстановку: во всю разворачивались работы по «термояду». Руководил ими Лев Андреевич Арцимович; теоретические исследования возглавлял Михаил Александрович Леонтович. Сектор Мигдала тоже был мобилизован. Трудились много, с азартом. Горячие семинары Арцимовича сменялись обсуждениями вопросов теории у М.А. Леонтовича. И все это в строго секретной обстановке — казалось, что до осуществления термоядерной реакции считанные дни. Охваченный молодым задором, я много работая и мало оглядываясь по сторонам, пока как-то М.А. Леонтович и А.Б. Мигдал не предложили мне «временно поработать вместе с А.М. Будкером, помочь ему». Только тогда я узнал, что Будкер отстранен от закрытой термоядерной тематики (хотя успел сделать существенные предложения по магнитному удержанию плазмы), не допускался на семинары и обсуждения.

Предоставленный сам себе он именно в эти дни пришел к идее «стабилизированного электронного пучка». В успешном продвижении данной идеи он видел, вероятно, единственную возможность как-

то удержаться в Институте и сохранить условия для работы. Думаю, что И.В. Курчатов поддерживал в этом Будкера, но большего, по-видимому, даже он сделать тогда не мог (1952—1953 гг.). Моя задача была — помогать Будкеру в обосновании и развитии его предложения. Общие физические представления у него созрели, но требовалось сформулировать строгие уравнения, исследовать их решения, искать возможные неустойчивости пучка и т.д. Периодически, по указанию И.В. Курчатова, результаты «пропускались» через ведущих специалистов.

Помню встречи с академиками В.А. Фоком, И.Е. Таммом, Н.Н. Боголюбовым. Идея устойчивого стабилизированного пучка воспринималась с трудом, выдвигались все новые и новые возражения и вопросы. В ответ требовались новые расчеты. Один наш пухлый отчет следовал за другим. Нам казалось, что все трудности позади, но очередное обсуждение требовало новых расчетов. Особенно острым критиком выступал В.И. Векслер. Он в это время развивал идеи коллективных ускорителей, и ряд его предложений Будкер, в свою очередь, критиковал. Дискуссии между ними проходили очень остро и не всегда корректно. Однажды А.М. Будкер, отвечая на многочисленные вопросы Векслера, сказал примерно следующее: «Тут и сто мудрецов сразу не ответят». Обидчивый В.И. Векслер воспринял эту реплику как оскорбление. Скандал пришлось долго улаживать Арцимовичу. Однако сам Будкер вовсе не преследовал цели оскорбить Векслера. Я уверен, что он считал свою ремарку шуткой, чтобы снять напряжение. Привычка держать наготове поговорки, шутки, анекдоты и выкладывать их, не контролируя особенно их уместность, сохранялась у А.М. до последних дней. Его манера многократно повторять шутки и анекдоты служила предметом постоянного подтрунивания. Он сам и друзья воспринимали это со смехом, но многие такой стиль не принимали. К «трудным» собеседникам кроме Векслера Будкер относил и Арцимовича.

Наша интенсивная совместная работа продолжалась свыше четырех лет. Она была очень продуктивна и полезна, думаю, нам обоим. Хотя иногда шла не совсем гладко. Разные представления были у нас в то время о критериях строгости, наглядности, соотношениях математики и физической интуиции при изложении результатов. Да и темпераменты сильно различались. Споры наши часто были громки и энергичны. Иногда вдруг А.М. затихал и жалостливо говорил: «Спаргачишка, ну почему Вы на меня кричите. Ведь я же все-таки Ваш учитель». Через много лет он повторял эту реплику с обращением на «ты»... Иногда А.М. все же отступал: «Давайте напишем совместно о том, что возражений не вызывает, а Ваши «штучки» делайте сами и включайте их в свою диссертацию».

В 1954—1955 годах положение Будкера постепенно укреплялось. Дело шло к созданию специального отдела для реализации его идей. Однако назначить Будкера начальником этого отдела И.В. Курчатов не решился (или не смог). В принципе, его сомнения можно понять, ведь Будкер в его глазах был теоретиком, довольно эксцентричным

и без всякого опыта руководства экспериментальным коллективом. Вместе с тем Игорь Васильевич понимал важность начинаемого дела и искал начальника — помощника Будкера — не только внутри Института. Подходящую, по мнению Курчатова, кандидатуру нашли в ленинградском физико-техническом институте. Новый начальник оказался человеком мало заинтересованным в основном деле, и такое положение очень угнетало Андрея Михайловича. По-видимому, с этого времени А.М. очень резко и гневно воспринимал чиновников в науке, берущихся за любую задачу, даже ничего в ней не понимая и рассчитывая «нанять» нужных специалистов. К счастью, И.В. Курчатов вскоре понял реальную ситуацию, и А.М. возглавил отдел, явившийся зародышем его любимого детища — новосибирского Института ядерной физики.

Но наши дороги на время разошлись. Я остался теоретиком в секторе Мигдала, увлекся другими проблемами, а в 1957 году был командирован в Данию, в Институт Нильса Бора. В конце 1958 года, возвратившись из Копенгагена, я узнал о решении Будкера переезжать в Новосибирск. Он был в радостном возбуждении, делился планами организации Института на новом месте, далеко от Москвы, куда «большой подлец сам не поедет, а маленьких можно не брать».

До окончательного переезда Будкера в Новосибирск контакты наши были случайными, но в 1961—1962 годах А.М. все настойчивей стал приглашать В.М. Галицкого и меня в Новосибирск, «хотя бы в гости». В начале 1962 года мы приехали, посмотрели и удивительно быстро репились переезжать совсем. Через три месяца Галицкий и я были уже сотрудниками новосибирского Института ядерной физики.

Будкер как физик, изобретатель, организатор, научный руководитель созрел и реализовался в этом Институте. Это большая и благодатная тема для будущих ученых и историков.

Будкер сам расцветал, набирался мудрости вместе с ИЯФом. В последние годы (после тяжелой болезни) у него стало проявляться мудрое прозрение старца, спокойно сознающего ограниченность своего срока. Отчетливо помню последний мой разговор с ним за день до его кончины. Мы гуляли по лужайке перед нашими домами (мы были соседями), и А.М. очень спокойно начал излагать свое завещание: «Я чувствую, мне совсем немного осталось. Все время думаю, что будет с Институтом. Очень прошу тебя поддержать Сащу Скринского. Я понимаю, что и ты будешь хорошим директором ИЯФа, и Сидоров, и Рютов. Но это будет другой Институт. Может быть, очень хороший, но другой. И старайтесь ему помогать». Дальше он спокойно продолжал о конкретных проблемах, больших и малых, о которых не следует забывать. Я старался его подбадривать, переводил разговор на более легкие темы. Но он мягко отводил мои попытки. Видимо, будущее созданного им Института — единственное, о чем он мог думать в оставшиеся ему часы.

С тех пор прошло более десяти лет. Через полгода после кончины Будкера я вернулся в Институт им. И.В. Курчатова, меня занимали новые проблемы как научные, так и организационные. Но чем

далее, тем больше сквозь собственную практику и опыт приходило сознание уникальности Будкера как научного лидера и директора новосибирского ИЯФа. Пытался анализировать его неординарные поступки и решения и реконструировать его принципы.

У А.М. было глубокое, может быть, им явно и не осознаваемое, интуитивное предубеждение против упорядоченности, заорганизованности, запланированности. Постоянное фантазирование — и научное, и организационное. Постоянно выявлялись новые идеи, в энергичное обсуждение которых он втягивал научный актив Института. Иногда, начавшись спонтанно, такие мозговые штурмы продолжались неделями, то затухая, то вновь разгораясь. Вот уже вроде все возможности просмотрены, ничего не найдено, и участники «штурма» готовы успокоиться и вернуться к своим очередным делам. Но не тут-то было! А.М. вдруг подбрасывает новую идею, и все начинается сначала. Хотя большинство таких «мозговых авралов» не получало завершения, но думаю, что А.М. придавал им некоторый высший смысл: будоражить научный коллектив, не давать умам лениться.

Нечто подобное возникло и в организационной сфере. Будкер постоянно предлагал что-то менять в структуре Института. Упразднить одни ячейки и образовывать новые. Мне даже казалось, что стоило какому-то административному звену хорошо начать работать по обычным меркам (установить четкий регламент, упорядочить документацию и т. п.), как А.М. предлагал его ликвидировать или преобразовать. Это был его способ убивать даже зачатки бюрократизма. Вопрос этот был для А.М. принципиален. Он не уступил даже резким требованиям В.М. Галицкого (ученого секретаря Института), который добивался большей четкости и плановости в работе Института. Конфликт с Галицким (которого он уважал и любил) А.М. переживал очень болезненно. Но отступить он не мог даже под угрозой отъезда Галицкого в Москву (что и произошло в 1965 году).

Своеобразным и очень важным звеном управления Будкер сделал Ученый совет Института, или Круглый стол. С привычным понятием Ученого совета он имел мало общего. Первоначальная идея была такой: собираться ежедневно в 12 часов дня на полчаса для обсуждения за чашкой кофе любых вопросов, как правило, заранее не планируемых. Дискуссии были самые разные: серьезные научные проблемы, организационные, кадровые, жилищные, международный обмен, новый фильм или местные новости. Иногда обсуждение сильно затягивалось, но незаинтересованные могли свободно уходить. Со стороны это все можно было воспринять как нечто не очень серьезное. Но сейчас я уверен в глубокой продуманности замысла Будкера. Круглый стол был для А.М. местом и способом обучения и воспитания своих единомышленников. Принять решение было делом вторичным. Главное — создавать общие научные, нравственные, этические позиции, учить взаимопониманию, конструктивному преодолению противоречий, уважению чужого мнения. Не во всем сам А.М. мог служить идеальным примером. Многие свои недостатки и слабости он обсуждал часто открыто и, как правило, с юмором. И очень любил пуб-

лично поиронизировать над ошибками других. Хотя критику своих поступков или решений со стороны воспринимал без юмора и удовольствия, но терпел и зла не держал. Очень часто А.М. говорил за Круглым столом больше всех остальных, но тем не менее стиль разговора был лишен какого-либо начальственного или менторского тона, и обстановка была глубоко демократичной.

Для активной работы ума, обдумывания и отшлифовки идеи ему необходима была доброжелательная аудитория. По натуре он был проповедник, его оружие было эмоциональное — логическое убеждение собеседников. А.М. испытывал творческое удовольствие, обращая априорных скептиков или даже противников в свою веру, каждый раз находя новые, нужные именно в данный момент аргументы.

Помню, он с детским бахвальством говорил: «Пробился к концу дня к председателю Госплана на 15 минут — проговорили 2,5 часа. Очень интеллигентный и мыслящий человек».

Но каким опустошенным и потерянным он бывал, когда его убеждения были бессильны и он терпел фиаско! Объективно его эмоциональное многословие могло быть антипатично людям сухим и четким. И уж, конечно, недоброжелателям это давало большие возможности для шельмования.

К счастью, И.В. Курчатов, а затем М.А. Лаврентьев поддерживали Будкера и его дело, снисходительно относясь к его эксцентричным чертам. А.М. любил вспоминать реакцию И.В. Курчатова на отзывы ведущих специалистов об идее Будкера о встречных пучках — все они были разные, но все резко отрицательные. Игорь Васильевич, посмеиваясь, заявил: «Значит, в этом есть что-то нетривиальное. Надо делать».

Во время становления новосибирского научного центра М.А. Лаврентьев активно и твердо поддерживал перспективные коллективы. ИЯФ, который быстро становился крупным, международно признанным институтом, был одним из его фаворитов. Но в последние годы жизни А.М. почувствовал резкое изменение обстановки. Блокировались многие инициативы Института, тормозилась работа.

Как ректор новосибирского университета я имел постоянные хорошие контакты с М.А. Лаврентьевым и пытался изменить ситуацию. К сожалению, мои усилия помогали устранить лишь отдельные недоразумения, но негативное отношение к А.М. оставалось, и в этот тлеющий костер постоянно подбрасывались новые поленья. В такой ситуации А.М. чувствовал себя безоружным и временами впадал в депрессию.

И все же у него была твердая опора — его родной Институт со сплоченным коллективом соратников, международное признание, дерзкие планы. Жизнь продолжалась.

В «центре сопротивления»

С.Т. Беляев. — Воспоминания об академике М.А. Леонтовиче. М.: Наука, 1996; Академик М.А. Леонтович: Учёный. Учитель. Гражданин. М.: Наука, 2003.

В феврале 1952 г. я с дипломом физико-технического факультета МГУ стал сотрудником теоретического сектора А.Б. Мигдала в Курчатовском институте (тогда ЛИПАНе). В коллективе Мигдала я не был новичком, так как уже с 1947 г. проходил практику, а затем и защищал там диплом. Как раз в это время разгорался ажиотаж в термоядерном направлении, где, казалось, вот-вот желанный результат будет достигнут. И часть сектора Мигдала бросают на развитие успеха. Теоретические работы курирует Леонтович. Я с молодым азартом включаюсь в работу, не пропускаю семинары Л.А. Арцимовича и теоретический семинар, которым руководит Леонтович.

Но однажды Михаил Александрович в присутствии Мигдала пошел со мной на откровенный разговор о беде, случившейся с А.М. Будкером (руководителем моего диплома), который лишен допуска к секретным работам и фактически отстранен от тех направлений, где он очень успешно и плодотворно работал, в том числе и от термоядерных исследований. Работы Будкера знает и высоко ценит Курчатов. И если уж он не смог отстоять Будкера, то естественно опасаться худшего. (Напомню, что в это же время набирало силу «дело врачей», и «чистки» не удалось избежать даже ЛИПАНу.) Есть надежда (как я понял, не только у Леонтовича, но и у Курчатова) на новую научную идею-изобретение Будкера. Аргументируя ее стратегической важностью, можно защитить и автора. Будкеру надо помочь довести идею до обоснованного предложения, и Михаил Александрович просит меня этим заняться.

Так началась наша совместная работа с Андреем Михайловичем Будкером, которая продолжалась около четырех лет. Некоторое время я еще посещал термоядерные семинары, участвовал в дискуссиях. Самому Будкеру вход на семинары был закрыт. Может быть поэтому Леонтович часто заходил к нам и спрашивался, как идет работа. Обсуждались и научные проблемы термояда, интерес к которому у Будкера сохранялся (именно он в 1953 г. впервые высказал идею об удержании плазмы в «магнитной бутылке»). Общение было неформальное, переходившее от одной темы к другой. Михаил Александрович явно пытался поддержать Будкера, не дать ему почувствовать изоляцию. А поддержка эта была полезна и даже необходима.

Курчатов хотел, чтобы предложение Будкера — релятивистский стабилизированный электронный пучок — прошел экспертизу ведущих теоретиков. Я помню беседы с В.А. Фоком, И.Е. Таммом, Н.Н. Боголюбовым, В.И. Векслером. Каждый раз возникали сомнения и вопросы, особенно по устойчивости пучка. Это требовало новых обоснований с детальными расчетами. Иногда возражения казались

придирками, и Будкер терял самообладание. (Особенно трудным оппонентом был Векслер, которого Будкер раньше сам жестко критиковал.)

Беседы с Леонтовичем очень помогали, он всегда умел успокоить и направить внимание на реальные научные проблемы. Его доброжелательная критика как правило позволяла подготовиться и к резкой критике оппонентов. При этом Леонтович не был начальником Будкера, его посещения, носившие характер «дружеских визитов», были лишены какой-либо формальности. Михаил Александрович свободно переходил от рекомендаций по конкретным физическим проблемам к «аналогичным» случаям споров и дискуссий в своей практике, а затем и к совсем, казалось бы, посторонним житейским вопросам. Общение с Леонтовичем и возможность обсудить с ним как научные, так и «дипломатические» проблемы, а иногда просто поговорить на отвлеченные темы очень поддерживали Будкера. С появлением Михаила Александровича сразу возникала атмосфера доброжелательности и открытости, лишенная какого-либо чиновничества. Вспоминаю один вступительный диалог:

– Михаил Александрович, вы вроде в новом костюме?

– Да, это Марфе Алексеевне где-то повезло, отстояла в очереди. Правда, ничего?

В августе 1952 г. у меня в семействе прибавление: родилась двойня. При ставке старшего лаборанта — явная проблема. Михаил Александрович делает мне предложение поработать (по совместительству) на кафедре теоретической физики в МИФИ, которой он заведует. Причем не упоминая и не соотнося это с моими домашними проблемами.

На кафедре возник еще один канал нашего общения. В МИФИ Леонтович слыл легендарной личностью, поражая своей принципиальностью и вместе с тем отзывчивостью. Последним качеством некоторые студенты даже злоупотребляли, прося у него взаймы. (Однажды я оказался этому невольным свидетелем.) Эта тема неоднократно обсуждалась, но, по-видимому, ее трудно исчерпать в связи с ее обширностью. Я лично имел в этом отношении лишь единичный опыт и был поражен умением Михаила Александровича концентрироваться на главном, отбрасывая все лишнее, что можно усмотреть из нашего диалога:

– Михаил Александрович, можно к вам по личному вопросу?

– Сколько?

После смерти Сталина (март 1953 г.) положение стало более терпимым. Группе ведущих физиков, лидером которой был Курчатов, удалось произвести «революцию» (вернее, «реставрацию») на физическом факультете МГУ.

До войны основными кафедрами физфака заведовали крупные ученые Академии: И.Е. Тамм, Г.С. Лауэнбергер, С.Э. Хайкин и др. Но во время войны МГУ и Академия наук были эвакуированы в различные города, и кафедры физфака заняли штатные сотрудники факультета, не обремененные научными заслугами, но преуспевшие

в политической демагогии. После войны физфак МГУ стал воинствующим центром «партийной физики», откуда постоянно исходили критика «буржуазных теорий» (квантовой механики и теории относительности) и персональная травля, в основном ранее преподававших здесь профессоров, с обвинениями их в махизме, физическом идеализме и пр.

В 1954 г. команде Курчатова удалось инициировать на физфаке «кадровую чистку»: были уволены с факультета наиболее одиозные фигуры, образован новый ученый совет, приглашены известные физики для заведования кафедрами. В составе десанта, высаженного на физфак, был и Михаил Александрович вместе с Арцимовичем. А нашу кафедру в МИФИ возглавил В.Г. Левич, который ранее был заместителем Леонтовича.

С 1954 г. положение Будкера также начинает улучшаться. Наша работа по обоснованию его идеи стабилизированного релятивистского пучка закончилась докладом на международной конференции в Женеве в 1956 г. (хотя и без участия все еще невыездного Будкера). Встал вопрос об экспериментальных работах. Я занялся другими проблемами, а в 1957 г. уехал на год в Копенгаген, в Институт Нильса Бора. Контакты с Михаилом Александровичем стали эпизодическими. Вспоминаю наши последние встречи. Лето 1979 (или 1980) года. Мы встретились в парке на территории Курчатовского института, и Михаил Александрович, помянув мое ректорство в Новосибирске, спросил: «У вас не сохранилось каких-либо контактов в МГУ? У меня внук, сын Миши Левина, поступает на мехмат. Боюсь, они его зарежут. Вы же знаете обстановку на мехмате». Я ответил, что с покойным ректором Р.В. Хохловым у меня были хорошие отношения, а после его гибели в горах контактов с новым руководством никаких нет. Поговорили о других делах и разошлись. Через некоторое время мы снова встретились почти на том же месте, и Михаил Александрович сразу начал: «Внука-то приняли», — и добавил, удовлетворенно усмехаясь: «Все-таки они меня боятся!» Михаил Александрович имел основания для такого заявления. Он по праву считался эталоном принципиальности и моральной твердости и не мог не реагировать на нечистоплотные поступки. Особенно ярко это проявлялось в жизни Академии наук.

Леонтович в Академии наук — большая и серьезная тема, которая неоднократно обсуждалась. Я затрону лишь некоторые эпизоды, которым был свидетелем после избрания меня в Академию в 1964 и 1968 гг.

Партийно-бюрократическое давление на Академию особенно ярко проявлялось во время выборов. Но именно во время выборов Академия могла открыто противостоять давлению. Однако для этого требовались предварительная «пропагандистская» работа и открытые выступления на Общем собрании. И если «центром сопротивления» практически всегда оказывались физики, то центральной фигурой у физиков был Леонтович. Именно к нему стекались истинные характеристики кандидатов, если противоречили официальным. Поэтому,

будучи «молодым академиком», я постоянно советовался с Михаилом Александровичем. Например:

— Михаил Александрович, как вы голосуете за гуманитариев?

— Для профилактики всех вычеркиваю, кроме тех, кого мне специально рекомендуют.

О выступлениях Леонтовича против некоторых одиозных кандидатов в Академию неоднократно писалось. Хочу добавить, что он иногда очень остро и неожиданно реагировал на обсуждение, казалось бы, рутинных дел. Представьте себе картину. Общее собрание Академии в Доме ученых. Рассматривается пункт программы об утверждении на новый срок директора одного химического института. Леонтович не сидит на месте, а прохаживается перед сценой из конца в конец, оглядывая зал. Кажется, что его не особенно интересует разбираемый вопрос. Но вот зачитывают характеристику, где среди прочего отмечается, что за прошедший срок директором выполнено свыше трехсот (!) научных работ. Вопрос ставится на голосование. И тут Михаил Александрович просит слова и предлагает не утверждать директора, так как «административные обязанности будут мешать его столь плодотворной научной работе». В зале общий смех, а испуганный, покрасневший директор оправдывается: это, мол, сотрудники сами вписывают меня автором, хотя я этого не требую и даже запрещаю... и т.п. В зале новый взрыв смеха.

И такие уроки Михаил Александрович давал Академии неоднократно. «Они» имели основание его бояться! А я иногда в трудные минуты стараюсь представить, как бы на моем месте поступил Михаил Александрович Леонтович...

Воспоминания о Ю.Б. Румере

С.Т. Белляев, Б.В. Чириков. — Сайт Новосибирского университета, 2001.

Впервые мы встретили Юрия Борисовича на его лекции в московском университете, куда он был приглашен прочитать спецкурс по своей «5-оптике». Мудреный термин привлек много слушателей, но не в меньшей степени и личность автора новой теории, ученика и сотрудника Ландау, таинственного профессора далекого Енисейска¹², расположенного, как тогда казалось москвичам, где-то на краю света.

С первых же слов лектор увлек аудиторию ясностью изложения, стройностью своих теоретических построений и каким-то необыкновенным юношеским задором. Эти черты Ю.Б. сохранил и до сегодняшнего дня. Стоит ему заговорить о любимой физике: «А вы знаете последнюю теорию Швингера? Это же необычайно красиво!» —

¹²О том, как Ю.Б. Румер попал в Енисейск, я рассказывал на столетии Ландау — см. с. 170.

начинает он, обычно понизив голос, с видом заговорщика, который не хочет волновать непосвященных. Глаза его загораются, и просто невозможно поверить, что вашему собеседнику уже под 70.

Физика для Ю.Б. не просто любимая профессия, а сама жизнь. Он занимается ею независимо от того, где он работает и в каких условиях живет. Даже трудности своей жизни он сумел обратить во благо любимой науки. «Если бы я не попал тогда в Енисейск, я никогда не нашел бы столько свободного времени, чтобы досконально изучить все эти математические методы», вспоминает Ю.Б. Выступая как-то перед выпускниками НГУ, он сказал, что самое главное в жизни — не терять надежды. И если вы настоящий физик, то рано или поздно добьетесь своего, куда бы не забросила вас судьба.

Характерная черта научного творчества Ю.Б. — стремление к совершенству создаваемой теории, высокая требовательность к ее логической стройности и строгости, нетерпимость к каким бы то ни было туманным «качественным» соображениям и расплывчатым гипотезам.

Ю.Б. часто говорит: «Ну, в этом я совершенно ничего не понимаю», фраза, которая означает, что в данном вопросе еще осталась какая-то неясность или неопределенность. Не менее характерна и эстетическая красота теорий Ю.Б., красота понятная, разумеется, лишь специалистам, но зато какой это мощный стимул для творчества всех, кто ощущает ее!

Если попытаться сопоставить науку и искусство, можно назвать Ю.Б. поэтом теоретической физики. Прекрасным примером его поэзии служит теория гравитационных волн. Трудности и туманные места этого явления, которых «не понимал» Ю.Б., связаны с незавершенностью общей теории относительности и даже с ее противоречивостью при введении тензора энергии-импульса. Ю.Б. изящно обошел все эти подводные камни, используя вместо этого тензор кривизны. Он многократно возвращался к этой проблеме и довел свою теорию «волн кривизны» до полного совершенства, обнаружив попутно глубокую аналогию этого явления с электромагнитными волнами. В результате сейчас теория Ю.Б. значительно более убедительна и мы бы сказали даже более реальна, чем существующие эксперименты Вебера. Разумеется, мы далеко от мысли, что эксперименты по гравитационным волнам не нужны, ибо, как любил говорить Эйнштейн, с которым, кстати, Ю.Б. имел счастье встречаться и беседовать: «Господь Бог изощрен...»

Еще менее нам хотелось бы спорить с тем очевидным положением, что Верховным Судьей в физике является Опыт. Однако, результаты опыта, как настоящего, так и будущего, могут быть описаны бесчисленным множеством способов, и Ю.Б. умеет выбирать из них самый стройный и глубокий, и это дает ему возможность заглянуть в будущее.

Нельзя не упомянуть и о таланте Ю.Б. как лектора. Если продолжить наше сравнение теоретика с поэтом, то нужно признать, что Ю.Б. является редким исключением. Как известно, поэты не умеют

читать свои произведения, музыка поэзии обычно безнадежно гибнет в монотонном декламации в одной тональности. Лекции Ю.Б. — это целый симфонический оркестр, звучащий во многих регистрах и находящий отклик в каждом из слушателей. Даже когда Ю.Б. выступает перед мировой аудиторией. Недаром его можно слушать часами, говорит ли он о своей новой теории периодического закона Менделеева, или об оригинальном подходе к классической проблеме энтропии, или о своих встречах в Геттингене. Умудренный большим жизненным опытом, он умеет в каждом случае сказать что-то интересное.

К Ю.Б. очень подходит замечание, сказанное как-то по другому поводу: «Он пережил слишком много, чтобы удовлетвориться легкодоступными поверхностными решениями». Может быть, именно поэтому так тянется к нему молодежь. Послушать его, поговорить и посоветоваться, и не только о физике, но и «за жизнь». И любовь эта взаимна. Ю.Б. с энтузиазмом возится и с ребятами из физматшколы, и со студентами университета, и с начинающими научными сотрудниками, которых бескорыстно старается вывести на твердую дорогу самостоятельного научного творчества, дорогу, часто ведущую в совершенно другие области физики.

Вспоминая АБ

С.Т. Беляев. — Воспоминания об академике А.Б. Мигдале. М.: Физматлит, 2003, с. 14–18.

В 1947 году я стал студентом 2-го курса физико-технического факультета МГУ, где часть дней недели занятия проводились в базовых организациях. Базой нашей группы стал Курчатовский институт, тогда таинственная «Лаборатория № 2», а затем «ЛИПАН». Кроме групповых лекций, практической работы в экспериментальных лабораториях нам были доступны и общие семинары, которые старался вести Игорь Васильевич Курчатов, а в его отсутствие его заменял Леонид Васильевич Грошев. На семинаре желанными содокладчиками и комментаторами выступали теоретики. К 1949 году я созрел для обращения к А.Б. Мигдалу с просьбой о моем переводе в его теоретический сектор. В качестве ответной реакции была предложена серия простых качественных задач, которые были успешно решены. (Между прочим, одни и те же «вступительные задачи» АБ использовал для отбора многих поколений своих учеников). Так я оказался учеником АБ, а с 1952 года в течение десяти лет и сотрудником его сектора. Мои воспоминания навеяны, в основном, этими годами постоянного общения с АБ. После моего отъезда в 1962 г. в Новосибирск встречи, хотя и не прерывались, но были эпизодическими.

Ко времени моего появления в руководимом АБ «Секторе 10» в нем уже были Б.Т. Гейликман, А.М. Будкер, В.М. Галицкий, потом появились Гречухин и Струтинский, затем Вакс и Ларкин. Участвовал ли лично АБ в отборе сотрудников, сказать не могу, но со-

став сектора явно выделялся своеобразием характеров, темпераментов и широтой интересов. Атмосфера была довольно либеральная и свободная, даже в выборе научных задач. По-видимому, Курчатов сознательно давал тематическую свободу АБ, лишь временами подбрасывая ему целевые задачи. Постоянно работать над «нужными задачами» АБ просто не мог, ему нужно было «загореться». АБ и другим давал свободу и не очень интересовался конкретными занятиями своих сотрудников, если они не входили в круг его прямых интересов.

АБ был очень своеобразным начальником, административные обязанности его тяготили, и он с удовольствием поручал их другим. На бюрократических бумагах вместо него обычно подписывался кто-либо из сотрудников, а когда случайно бумаги приносили в его присутствии, он предварительно в шутку спрашивал: «Покажите, как я сейчас расписываюсь». Комната, считавшаяся его кабинетом, обычно использовалась для общих дискуссий. Если при появлении АБ дискуссия не утихала, АБ слушал некоторое время, а потом мог сказать: «Давайте так: вы тут за меня поработайте, а я пойду...». Только после этого все расходилось по своим комнатам.

Следить за научными занятиями подчиненных АБ также считал излишним, считая, по-видимому, что главное — научная атмосфера в секторе и его собственный пример. Лишь при получении прямых заданий или вопросов от Курчатова устраивал их обсуждение. Но когда прояснялся принципиальный подход к решению и оставалось все тщательно рассчитать, он терял интерес и отдавал инициативу другим.

Работал он обычно дома, а свой сектор рассматривал как своеобразный дискуссионный клуб, появляясь там пару раз в неделю в основном для рассказа о своих последних результатах или новых идеях. В работе теоретика всегда есть периоды поиска подходов к задаче и путей ее решения. Эти этапы «проб и ошибок» АБ проходил сам и редко выносил на обсуждение. Предметом дискуссии были лишь детали решения, конкретные шаги. Главное не подлежало обсуждению. Для него было важно иметь активного заинтересованного собеседника, но только для оттачивания своей логики и аргументации. Роль эта бывала не простой и не очень приятной. От собеседника требовались вопросы и критика деталей, а не предложения каких-либо альтернатив. Скажем, Будкера невозможно было даже представить в роли такого собеседника. Он сразу предлагал что-то оригинальное: «Кадя, а почему бы Вам...?» — на что АБ резал: «Андрей! Я продумывал это не одну неделю, а Вы только пять минут назад об этом услышали. Неужели Вы надеетесь сообщить мне что-то новое!» Большинство старалось играть роль пассивных слушателей, а жертвой обычно становился интеллигентный Галицкий. Дискуссии с ним АБ особенно ценил, и только с ним вызрела совместная публикация. Я представляю, как не просто было работать вместе с АБ в то время. Пару раз он предлагал мне поработать вместе. Это происходило у него дома. АБ брал пачку чистой бумаги и начинал излагать идею,

выписывая формулы. Моя роль была не очень понятна, и пытался делать замечания или предлагать альтернативы, но АБ был поглощен своими мыслями. А когда чувствовался тупик и была необходимость что-то пересмотреть, он переключался на другое: обсуждали его новые скульптуры, книжные новинки или фильмы. В конце 50-х АБ предложил Галицкому и мне написать книгу о квантовой теории многих тел. Договорились отключиться от всего, уединившись зимой на даче его приятеля-художника. В результате мы славно провели время, но дальше пары страниц общего плана дело не пошло.

В научных дискуссиях АБ выглядел очень самоуверенным человеком. Он действительно высоко оценивал свои возможности, брался только за сложные задачи и развивал оригинальные методы. Считал, что следить за научной периодикой — пустая трата времени.

Многие годы для него главной задачей была сверхпроводимость. Он анализировал появляющиеся этапные статьи и каждый раз доказывал бесперспективность предлагаемых другими моделей. Созрело убеждение, что решение возможно только в рамках фундаментальной теории твердого тела. Триумф квантовой электродинамики подсказывал путь, и к 1957 году был создан основной аппарат квантовой теории многих тел и электронного газа в металлах в частности. Но на финише удача сопутствовала другим. Помню, на семинаре в институте Физпроблем, где обсуждалась новая теория сверхпроводимости БКШ, в перерыве Ландау упрекнул меня и Галицкого:

— Знаю, что АБ за журнальными публикациями не следит, но почему вы не указали ему на заметку Купера. Ведь после этого для АБ ничего не стоило сделать все остальное. У него все было готово.

Ландау мы ничего не возразили, но потом Галицкий мне сказал:

— Говорил я АБ об этой работе, он ее не воспринял.

В широком понимании АБ относил себя к школе Ландау и обсуждал с ним свои главные работы, но отношение АБ к Дау было своеобразным. Ценил свою независимость и самостоятельность, АБ держался немного обособленно и старался подчеркивать различия стилей работы. Известна удивительная интуиция Ландау. Часто решение сложных задач он качественно «угадывал» без вычислений. АБ же тяготел к математически более строгому подходу. Не раз АБ появлялся в секторе и с возбуждением заводил разговор о том, что Ландау конечно же ошибся и он это докажет. Но как правило, через какое-то время АБ заявлял: «Дау оказался-таки прав. Не понимаю, как он до этого дошел, ведь не мог же он проделать мои вычисления». Как различие стилей, так и плодотворность их комбинации можно увидеть из сравнения пионерских работ Ландау и Померанчука по тормозному излучению релятивистских электронов в плотной среде и последовавшей в их развитие фундаментальной работы АБ.

Частично эта работа была сделана АБ вместе с прикомандированным из Тбилиси «докторантом» Н.М. Полиевктовым-Николадзе. (У АБ были очень теплые отношения с Андроникашвили, директором института в Тбилиси и, по-видимому, они оба согласовали этот вопрос с Курчатовым.) Полиевктов-Николадзе был очень хорошим

математиком, и вместе с тем в нем чувствовалась особая межэтническая интеллигентность, унаследованная от двух известных в Грузии фамилий. Последнее обстоятельство играло для АБ явно не последней ролью. С Полиевктовым АБ работал необычно. Он сразу признал его более высокую математическую квалификацию и открыто говорил об этом. Работа шла более традиционно, с разделением задач и последующим синтезом. В то время это был для АБ особый случай.

Один из многочисленных розыгрышей АБ был также связан с Полиевктовым. После приезда АБ повел его представиться Курчатову. Договорившись с секретарем, АБ вошел в кабинет один, немного изменив внешность (подтянул ниткой нос и взлохматил шевелюру), и стал представляться с грузинским акцентом. Курчатов только в процессе беседы понял подвох и расхохотался. Об этом розыгрыше АБ неоднократно рассказывал с гордостью.

АБ в работах прокладывал новые пути. Даже когда его путь проходил по уже многократно вспаханному другими, он не утруждал себя предварительным знакомством с существующими моделями и результатами. Главное — уверенность, что его метод оригинальный и правильный. Когда погасла звезда сверхпроводимости, он создает новое направление — теорию конечных ферми-систем, в которой стал развивать оригинальные подходы к описанию свойств ядер. Как-то после доклада на международной конференции в Дубне его спросили, как соотносится его теория конечных ферми-систем с уже существующими. В ответ АБ напомнил анекдот о старом цыгане, который, выйдя из палатки и увидев кучу перемазанных детей, подумал: «надо бы их вымыть». Но затем, махнув рукой, произнес: «А... , прощай новым сделать!»

В период конечных ферми-систем АБ заметно меняет стиль работы. Теперь вокруг него большая группа учеников, много совместных публикаций, как журнальных, так и монографий. Для меня, знавшего его в основном в его «период сверхпроводимости», эта метаморфоза поразительна. Но этот этап я наблюдал со стороны, лишь изредка обсуждая с АБ некоторые общие проблемы.

В середине 70-х АБ позвонил мне в Новосибирск и предложил поехать с ним в США. Я ответил отказом, был очень загружен. Но во время нашей встречи в Москве АБ вернулся к этому предложению: уже давно его не выпускают за границу, но теперь вроде запрет снят, и у него много интересных предложений из Америки. Но ему навязывают сопровождающих, с которыми он ехать не может, а со мной его могут выпустить. «Спартак, неужели Вы не можете уважить своего старого учителя!»

Месяц нашего путешествия по Америке был очень насыщен, АБ был неутомим, не пропускал любую возможность новых знакомств и дискуссий. Вместе с тем всячески старался удовлетворить свою жажду путешествий и приключений. Первый визит был в Лос-Аламос. После этого за три нерабочих дня (включая Labor day) на машине Дэвида Кэмпбелла (David Campbell), местного молодого теоретика, мы втроем, меняя друг друга за рулем, проехали около двух тысяч

километров на север. После этого вдвоем на самолете продолжили путь до Беркли. А далее были Санта-Барбара, Чикаго, Иллинойс, Нью-Йорк, Лонг-Айленд.

В Санта-Барбара АБ просил позвонить Фейнману в Калтех и договориться о встрече. По-видимому, это было нелегко, но встреча была назначена, и после автопробега Санта-Барбара — Лос-Анджелес — Пасадена встреча состоялась. Деталей разговора я уже не припоминаю, но сохранилось впечатление взаимного прощупывания общих интересов. Инициатива принадлежала АБ, он говорил о своих общих идеях, π -конденсате и старался пробудить интерес собеседника, вызвать дискуссию. Фейнман же в это впрямую «не включался», а делал лишь ассоциативные замечания. Со стороны было очень любопытно следить за этим «поединком» двух научных лидеров, поглощенных своими собственными проблемами. Они явно почувствовали силу друг друга, но осознали, что рабочие отношения невозможны. Встреча с Фейнманом была особым событием. Остальные рабочие встречи проходили более традиционно. Всюду были доклады на семинарах, дискуссии, но все остальное время АБ требовал предельно насытить «культурной программой» по своему вкусу. Его авторитет был очень высок, и хозяева старались выполнить все его пожелания.

Автомаршрут из Лос-Аламоса проходил через пустыши с лунным пейзажем, индейские резервации, ночевали и встречали рассвет у Большого Каньона. Но АБ пожелал также нанять маленький самолет для часового полета в каньоне. Специально заехали на место соревнований по запуску воздушных шаров. В Санта-Барбара мы, конечно, плавали в океане и пробовали осваивать серфинг. А когда выяснилось, что у одного нового знакомого профессора есть яхта, а у другого — самолет, то АБ не мог отказаться от обоих приглашений. На яхте он просил подъехать к пляжу nudistov, а когда узнал, что это запрещено, то предложил встать на якорь и направиться к пляжу вплавь. Поплыли. На шестиместном самолете АБ сидел рядом с хозяином-пилотом, я — позади них. АБ спросил, трудно ли управлять самолетом, на что ему было предложено самому попробовать. АБ, не раздумывая, взял управление на себя и даже пытался как-то маневрировать. На восточном побережье было уже холодно, но АБ настоял на купании в океане: «Когда еще придется искупаться в двух океанах?»

АБ был очень многогранен в своих интересах и увлечениях. Искусство, спорт, общение с интересными ему людьми, казалось, занимали все его время. Причем любым увлечениям он отдавался с неистовством. Ярче вижу его на горном склоне, летящим вниз на плохо управляемых им лыжах под крики его молодых знакомых: «АБ, берегите себя для науки!» Но он не мог беречь себя только для науки. И тем удивительнее, как много он для нее сделал.

О Ландау: «Делать всё, что можно, но делать хорошо»

Выступление С.Т. Беляева на Научно-мемориальной сессии, посвященной столетию Л.Д. Ландау, проходившей в Центральном доме ученых 19–20 июня 2008 г. Троицкий вариант, 05.08.2008, Вып. 9N (827). Подготовила Н. Демина. Редакция: С.Т. Беляев.

И.М. Халатников здесь сказал, что появилось много «детей лейтенанта Шмидта», которые называют себя учениками Ландау, хотя ни разу в жизни его не видели или встречали мельком. Поэтому я сразу скажу о своих отношениях с Л.Д. Ландау. В список 43 коллег, сдавших ему теорминимум до 1962 г, я не вхожу. Я сдавал ему теорминимум, но сдал только две трети. После этого у меня всё так сложилось с работой, что я просто не мог оторваться на что-то иное. Так что формально я не принадлежу к школе Ландау.

С другой стороны, я могу считать себя его учеником, потому что учился на Физико-техническом факультете МГУ (это был первый и последний выпуск Физико-технического факультета МГУ), где преподавал Ландау. Вместе с П.Л. Капицей он читал, во-первых, курс общей физики на 1-м курсе, но я сразу поступил на 2-й. Нам он впоследствии читал квантовую механику. Так что я ему сдавал экзамены там.

Кстати, стоит рассказать о том, как он читал свои курсы и что он требовал, что считал важным. Например, когда он читал квантовую механику, то иногда на лекцию приходил не он, а Е.М. Лифшиц. Изучая свои записи, я потом понял, когда он присылал Лифшица, а когда приходил сам. Когда решались вопросы принципиальные и нетривиальные, тогда обязательно был сам Ландау. Когда всё сводилось к рутинным вычислениям, когда основные принципы были уже определены, а нужно было получить какие-то формулы, то часто приходил Евгений Михайлович. Так, две трети курса нам прочитал Л.Д. Ландау, а одну треть — Е.М. Лифшиц.

Его акценты на идейную, физическую сторону в сравнении с математическим оформлением проявлялись не только в образовании. В этой связи важно отметить, что Ландау считал правильной научной работой, какова там должна быть доля формальных вычислений, где проходит граница между наукой и формальными изысками, наукой и «отвалом», патологией. Какая работа, по Ландау, может считаться нормальной, правильной, а какая — недодуманной и недоделанной?

Я постоянно бывал на семинарах Ландау, практически не пропуская, так что у меня сложились определенные соображения на этот счет. На семинарах докладывались и оригинальные работы, но чаще — работы, опубликованные в новых журналах. Доклады эти заметно различались по активности участия Ландау. Известно, что, прежде чем пропустить на семинар новую работу, он требовал сначала предварительной личной беседы с автором, и только после

этого он давал добро на выступление на семинаре. Эта предварительная дискуссия с автором заметно снижала активность Ландау на семинаре. Его роль сводилась к дополнительному (к докладчику) разъяснению ключевых положений, обычно по просьбе кого-либо из «первых рядов» (Померанчука, Зельдовича, Гинзбурга,...). Молодым докладчикам журнальных работ приходилось «пропускать» их через Ландау прямо на семинаре, что не всегда удавалось. Причем не всегда было ясно, «кто виноват» — докладчик или авторы статей.

Я работал вместе с А.Б. Мигдалом, который хотя и не сдавал Ландау теорминимум, но явно принадлежал к школе Ландау. Интересно сравнить стиль их работы. Мигдал, как вы знаете, был самолюбивым человеком и считал себя физиком очень высокого ранга. Он признавал первенство Ландау, но считал, что в чем-то его превосходил, было некое соревновательное отношение. Главной «своей» проблемой Мигдал считал сверхпроводимость и постоянно занимался ею более 10 лет, пробуя разные варианты. Каждую новую идею старался «пропускать» через Ландау. Иногда после такого случая он приходил возбужденный, заявляя: «На этот раз предсказание Ландау — явная чушь. Я ему докажу». Полторы недели он сидит дома и проводит многостраничные расчеты. После этого Мигдал приходит и сокрушенно говорит: «Ландау оказался прав. Как он до этого дошел? Ведь не мог же он провести такие же расчеты».

Я тоже беседовал с Ландау, хотя не так много, и тоже осознаю, что у него была какая-то удивительная физическая интуиция, когда до всяких вычислений он мог предсказать хотя бы качественный результат.

В физике была и в какой-то мере есть и сейчас другая школа — Боголюбова. Надо сказать, что обе школы сыграли важную роль в развитии физики, хотя общего между ними мало. У Николая Николаевича Боголюбова видение физических процессов шло через математику. Он доходил до физического смысла проблемы через математические уравнения. У Ландау было как-то совершенно иначе благодаря редкой и удивительной физической интуиции.

Еще одним взглядом на Ландау я обязан Юрию Борисовичу Румеру, с которым мы много лет контактировали в Новосибирске и по работе, и в домашней обстановке. Это — уникальный человек с очень трагической судьбой. Он много рассказывал о Ландау, поэтому мне бы хотелось сослаться и на его мнение. Румер говорил, что впервые встретился с Ландау благодаря Эренфесту, в Берлине, во время физического конгресса, куда съехалась вся научная элита: Резерфорд, Эйнштейн и др. Эренфест сказал: «Приходите, я Вас познакомлю с очень интересным молодым человеком из России». И представил Ландау Румеру так: «Вот это Ландау, не бойтесь, он не кусается». Но, как говорил Румер, на самом деле, Ландау таки «кусался», и очень часто. Я хотел бы вам зачитать некоторые фрагменты из воспоминаний Румера об этой первой встрече с Дау.

«В ту первую встречу Ландау мне очень понравился. Мы говорили о физике, и я поразился тому, как легко он её знает, как гибко

понимает, «играючи», как птица поет. Он был рожден для физики. Мы поговорили о том — о сем, и я определил, что он, пожалуй, образованнее меня. Но ненамного, а о большем я не подозревал. Не знал, что в этот день судьба меня свела с одним из самых блестящих умов нашего века. Жизнь раздала оценки потом. Мы были на равных. Он был задирист, но прост. И потом я вчера был у Эйнштейна, а он не был».

Румер также вспоминал слова Ландау, что точно так же, как все хорошие девушки уже разобраны и замужем, так и все хорошие задачи уже решены. Ландау не раз сокрушался, что он немного опоздал на становление квантовой физики. Это было в декабре 1929 г. А, между прочим, в середине следующего, 1930 года Ландау таки нашел свою хорошую задачу, известную как «диагмагнетизм Ландау».

Теперь я хотел бы дать некоторые комментарии к словам Румера о Ландау: «... он, пожалуй, образованнее меня. Но ненамного...». Встретились молодые люди, Ландау — 21, Румеру — 28, и сразу почувствовали, как они равно хорошо образованы. Где и как они получали свое образование в то сложное время? Я начну с Румера.

Юрий Борисович Румер родился в семье богатого негоцианта, купца первой гильдии Бориса Ефимовича Румера. Его семья занимала целый этаж в трехэтажном особняке в центре Москвы, на Маросейке. На 3-м этаже того же дома жила семья известного адвоката Кагана, в которой росли две девочки, ставшие затем известными как Лиля Брик и Эльза Триоле. (Обе семьи затем породнились, Осип Брик доводился Ю.Б. Румеру двоюродным братом.) Юра был последним ребенком в семье. С малолетства его воспитывала няня из немецких переселенцев, так что немецкий был его вторым родным языком (чему немало удивлялись его немецкие профессора и коллеги во время его пятилетней стажировки в Германии). Два его брата — на 17 и 18 лет старше его — получили отличное классическое образование. Старший, Осип Румер, стал известным лингвистом, знал 26 языков, в том числе древние и восточные, блестяще переводил, в том числе Платона и Горация, Шекспира и Омара Хайяма.

В этих двух дружных семьях все воспитывали друг друга. Румера не интересовали классические языки, поэтому вместо гимназии он поступил в реальное училище. Война нарушила эту идиллию. Юре пришлось экстерном окончить училище и перебраться с отцом в Петроград. Здесь он успешно сдал экзамены в университет и его, 16-летнего, приняли. Шел революционный 1917 год, занятий практически не было. К счастью, Борису Ефимовичу удалось найти работу при новой власти в Москве, и Юра перевелся в Московский университет, где был зачислен на математический факультет. Математическая жизнь в университете была ключом. Там работали Жуковский, Чаплыгин, Егоров. Но основным генератором был Николай Лузин, в честь которого эту удивительно успешную школу называли «Лузитанией». 17-летний Румер активно включился и в математические дискуссии, и в бурную культурную жизнь этого коллектива.

Дальнейшее его образование напоминает приключенческий фильм. Время было голодно, поэтому, не прекращая студенческих занятий, Румер с отличием закончил военно-инженерные курсы, а затем стал на них же преподавать. Одновременно он поступил на курсы восточных языков при академии Генерального штаба, где слушателям выдавали продовольственный паек, а персидский язык он немного знал от братьев. Как лучшему слушателю Румеру даже предложили поехать переводчиком в советское посольство в Персию. Он провел там полгода и еле выбрался оттуда живым. Он вернулся в Лузитанию в 1924 году. С корабля — на бал теории относительности. Тогда он и решил, что нашел свой путь в жизни.

О том, как получал образование Ландау, здесь говорилось много. Это был Ленинградский университет, а не Московский, и время было другое. После относительной «революционной свободы» началось выстраивание своеобразной «пролетарской вертикали». Несколько лет назад мне в букинистическом магазине попала брошюра «Молодые ученые» выпуска 1930 г., вышедшая в серии библиотеки журнала «Юный пролетарий». В этой книжечке много разных очерков, в которых описывалась борьба, которая шла в ЛГУ против засилья «чуждых элементов». Там, в частности, написано, что до 1928 г. в университетских лабораториях происходила настоящая классовая борьба. «Реакционная» профессура старалась заполнить кафедры «чуждыми элементами». До 1928 г. на 85 аспирантов университета приходилось только 2 коммуниста и ни одного комсомольца. Представляете! В ней есть один очерк (почему я собственно остановился на этой книжке), который назывался «Письмо из Кембриджа». В нем поносился аспирант Георгий Гамов, который был послан в Кембридж и, будучи там, не присылал отчеты в комсомольское бюро. Ему один раз послали запрос, второй, а после третьего запроса он, наконец, прислал издевательское, как они посчитали, письмо, в котором было сказано, что «то, чем занимаются ученые, определяется не отчетами, а конкретными статьями. Разговаривайте с учеными, если вы сами в статьях не разбираетесь». Такой была обстановка в то время. Поэтому что можно сказать? Талантливые люди в то время фактически самообразовывались, и это очень существенно. И оценка Румером уровня образованности Ландау при их первой встрече знаменательна.

С первой встречи Румера и Ландау между ними возникли дружеские отношения. Румер вернулся в СССР в 1932 г. и стал профессором МГУ, но часто ездил в Харьков для встреч с Ландау. Дружба их крепла. Когда Дау в 1937 г. по приглашению Капицы переселся в Москву, он сначала поселился у Румера. В коммунальной квартире было тесно, но весело. Не забывали и о науке. Хотя у каждого были свои интересы, появились и совместные работы. Написали даже научно-популярную книгу «Что такое теория относительности», смысл которой Ландау шутливо определил как «два жулика уговаривают третьего, что за гривенник он может понять, что такое тео-

рия относительности». Книга эта будет переведена на 20 языков, но ждать первой публикации пришлось 20 лет.

Ландау и Румера арестовали в один день, 28 апреля 1938 г., в день рождения Румера. Дау освободили через год. Румер, с приговором «за связь с врагом народа Ландау», просидел 10 лет в «шарапке» с Туполевым, а потом еще прошел через 5 лет ссылки, в должности профессора Енисейского учительского института. Здесь открылась возможность почтовой переписки, и Ландау старался всячески помогать Румеру, но полной реабилитации пришлось ждать до 1954 г.

Возвращаясь к Ландау, хотел бы отметить, что он предъявлял очень высокий уровень требований к научной работе. При этом система экспертизы Ландау порой давала сбои: иногда отбрасывались задачи, которые сами по себе не были патологичными, но их форма была несовершенна. Я напому, что на семинаре статьи, скажем, Оге Бора (Aage Bohr) и Моттelsonа (Ben Roy Mottelson) по обобщенной модели ядра (в будущем получившей признание в виде Нобелевской премии 1975 г.) Яков Смородинский рассказывал три раза. Вначале Ландау эти статьи совершенно не понимал, зачем и что они там сделали. Смородинский был выгнан с первого доклада. Второй доклад он пытался провести, но был выгнан и во второй раз. И только на третий раз, наконец, Ландау понял, в чем же смысл работы.

Все это — пример того, что иногда в системе экспертизы Ландау были сбои и такой высокий уровень требований приводил к тому, что работы уходили от его внимания. Я мог бы приводить и другие примеры, но думаю, что о них могли бы рассказать более близкие участники этих событий. Это относится, например, ко времени обнаружения несохранения четности, когда мнение Ландау оказалось слишком жестким, из-за чего некоторые работы наших физиков не были своевременно опубликованы. Это были уроки, которые получил сам Ландау, и, понимая это, он впоследствии сделал некоторые послабления в своих жестких критериях.

Известно, что сам Ландау фактически не следил за новыми статьями в журналах. Считал, что если появится что-либо стоящее, то ему расскажут. На самом деле, это является проблемой для любого исследователя. Либо тратить много времени на то, чтобы изучить журналы, либо работать над своими проблемами и не читать статьи других. Ландау считал, что его ученики должны заниматься поиском нужных статей и делать доклады на семинаре. Сбои были возможны. Я вспоминаю совершенно особый случай, когда докладывалась работа Бардина–Купера–Шриффера на семинаре. В перерыве мы стояли с Галицким у доски, что-то обсуждали. Подходит к нам Ландау и говорит: «Слушайте, я не могу вас понять. Знаю, что Мигдал не читает журналы, но неужели вы ему не могли рассказать о работе Купера, которая была опубликована полгода назад? У него же был бы весь необходимый аппарат для завершения работы по сверхпроводимости». Надо сказать, что именно в год опубликования статьи БКШ Мигдал подготовил очень пространное фундаментальное исследование о металлах, их свойствах и доказал, что в обычных металлах

не может быть сверхпроводимости. Прочитав статью БКШ, Мигдал свою статью из печати забрал, внес коррективы, и она вышла под другим названием — как теория не сверхпроводящих металлов. (А о работе Купера мы Мигдалу говорили, но он не внял.) После случая со сверхпроводимостью Ландау сам стал бегло просматривать основные журналы и отмечал статьи для доклада на семинарах.

Теперь я хотел бы подвести некоторые итоги того, что нам оставил Ландау в своих требованиях и своих критериях, своих оценках, насколько они сегодня важны и актуальны. Прежде всего, его идеи, связанные с образованием. Он считал, что учить надо главному. Умению анализировать проблемы и отработке технических навыков. В теорфизике это сводится к отношению между физикой и математикой. В этой связи следует упомянуть его известное письмо заведующему кафедрой математики Физтеха. Это письмо теперь ходит по многим вузам страны, и физикам говорят: «Ваш Ландау не понимал значение математики». На самом деле, это показывает, что люди не понимают значение того, что сказал Ландау.

Ландау видел, что в теоретической физике идет большая работа по совершенствованию формального аппарата, но он сам, насколько я понимаю, относился к этому очень скептически. Я знаю, что он долгое время не хотел разговаривать с В.Н. Грибовым, считая, что новая формулировка квантовой электродинамики, которую тот предлагал, может быть и интересна, но не принципиальна. И я видел, как его уговаривал И.Я. Померанчук выслушать Грибова. В результате Ландау понял, что ошибался в оценке. Требования Ландау, его критерии, иногда были слишком жесткими. Но на вопрос, что же все-таки лучше: жесткие или же размытые оценки как работ, так и учеников, ответ может зависеть от места и времени. Все проверяется результатами, уровнем школы и её научных результатов. Думаю, что на многое, что сегодня называют наукой, Ландау и смотреть бы не стал.

Главное наследство, которое нам оставил Ландау (кроме своих конкретных работ), — это не только уникальный «Курс теоретической физики». Он оставил нам представления о том, как должна строиться структура физики (а может быть, и других естественных наук). Как должно строиться обучение. Как следует совмещать исследования с образованием и воспитанием учеников, обращая при этом особое внимание на развитие навыков самообразования.

Наконец, осталась школа Ландау. Сегодня это — мощная группа известных ученых со своими школами и учениками. Но без выделенного центра она постепенно теряет чувство принадлежности к единому коллективу. Нужна общая задача. Сегодня это может быть оздоровление социальной атмосферы, связанной с образованием и наукой путем внедрения тех самых критериев, которые оставил нам Ландау.

Теперь что касается области наших исследований сегодня. Понятно, что теоретическая физика развивается, меняется и вычислительная компьютерная составляющая в исследованиях. Неизбежно

меняется соотношение между формой и содержанием, между тем, что есть «наука», а что — формальный изыск. В связи с этим я вспоминаю доклад П. Дирака (Paul Adrien Maurice Dirac) на семинаре Ландау. Дирак оказался довольно нудным докладчиком, он постоянно писал на доске какие-то формулы, переписывал уравнения. Все мы были немножко удручены: пришел классик, а большого впечатления о себе не оставил. Мы говорили об этом на следующем семинаре с Дау, и он сказал: «Понимаете, трагедия Дирака состоит в том, что он один раз сделал гениальную работу, а после этого считал, что нельзя делать работ ниже, чем он уже сделал. Поэтому фактически у него больше задач в жизни нет».

Работа самого Дау представляла собой совершенно противоположный подход. Он считал, что нужно делать всё, что можно, но делать хорошо. Хотя Ландау и говорил, что уже не осталось хороших задач, задачи, которыми он загружал свой ум, у него постоянно были. Среди них были и очень хорошие по уровню, и совершенно уникальные, и рядовые. Он не чурался ни тех, ни других. Появлялась задача, и он её решал. Думаю, что такой подход также следует отнести к наследству Ландау.

Я бы хотел на этом закончить и призвать школу Ландау к консолидации и активности, чтобы продолжить работу по тем направлениям и с теми принципами, которые нам оставил Дау. Сейчас в науке и образовании сложилась такая ситуация, что усилия в этой области крайне необходимы. Сделать эту работу качественно может как раз та школа Ландау, которую он оставил. Спасибо.

Фотоальбом



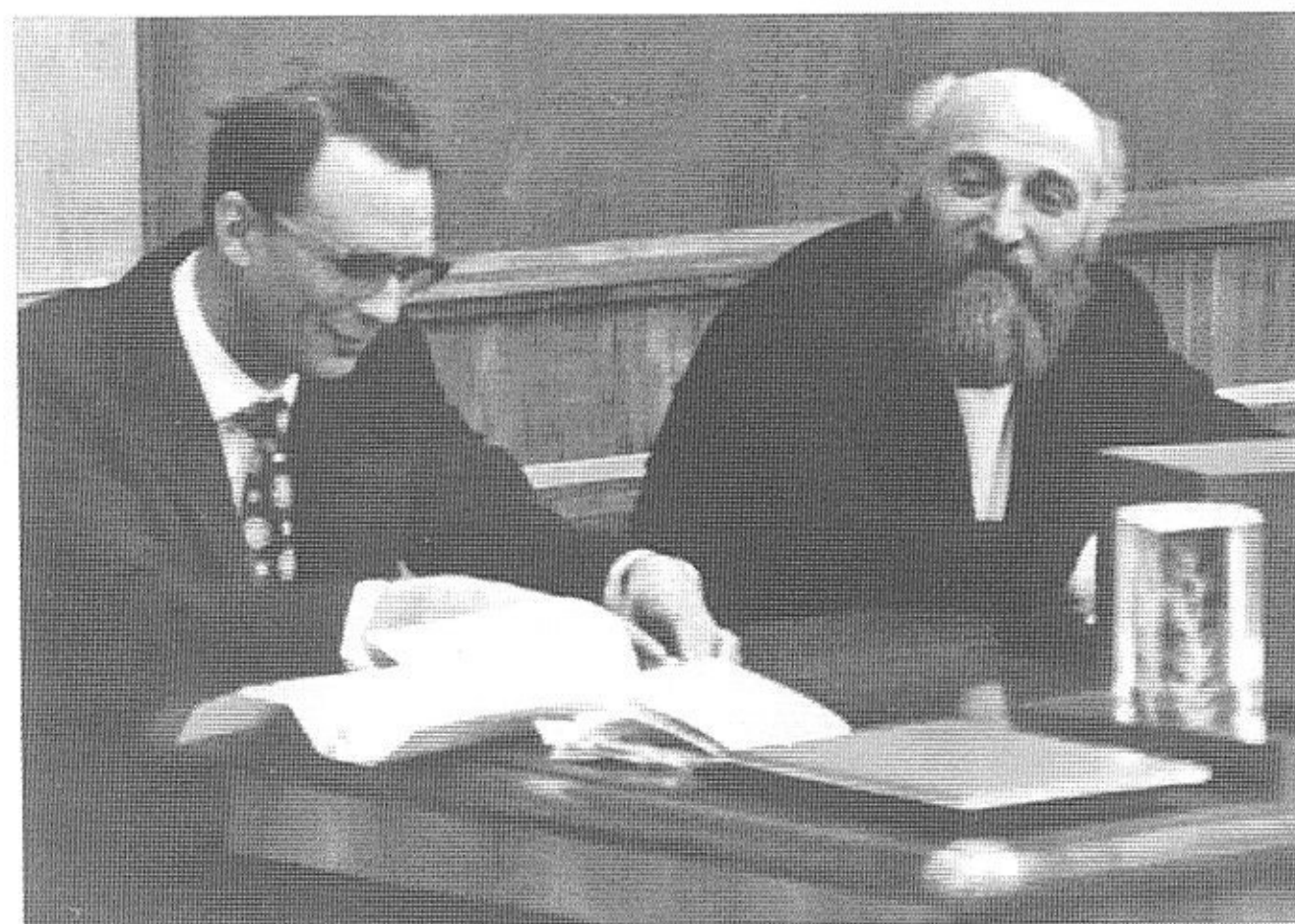
С.Т. Беляев, 1943 г. (фотоархив С.Т. Беляева)



О.М. Белоцерковский и С.Т. Беляев, станция Долгопрудная, 1947 г. (фотоархив МФТИ)



С.Т. Беляев с учащимися физико-математической школы, Новосибирск, 1965 г. (автор снимка Р.И. Ахмеров, фотоархив СО РАН)



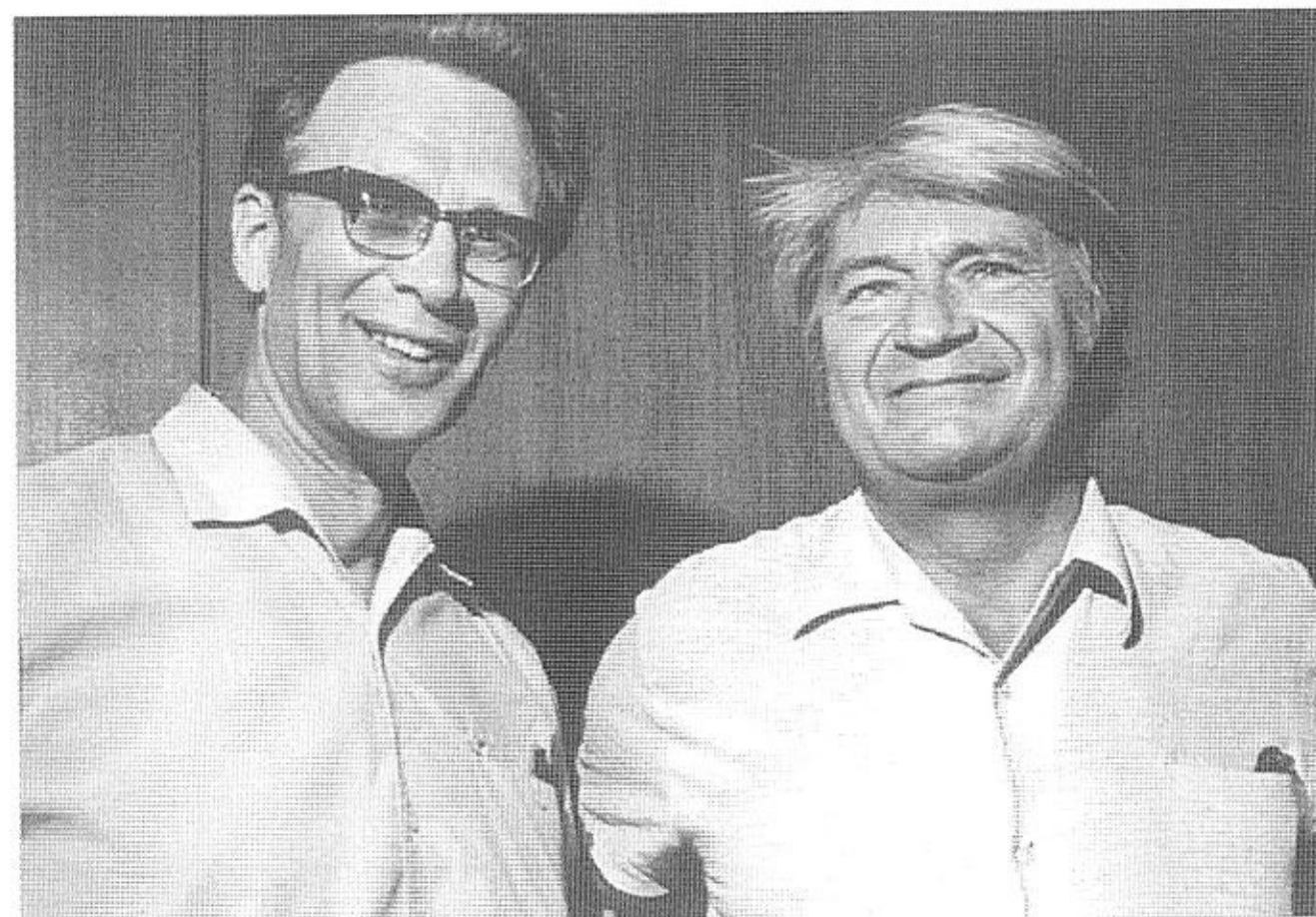
С.Т. Беляев и Г.И. Будкер, Новосибирск, 1970-е годы (фотоархив С.Т. Беляева)



С.Т. Беляев и М.А. Лаврентьев, Новосибирск, 1970-е годы
(автор снимка В.Т. Новиков, фотоархив СО РАН)



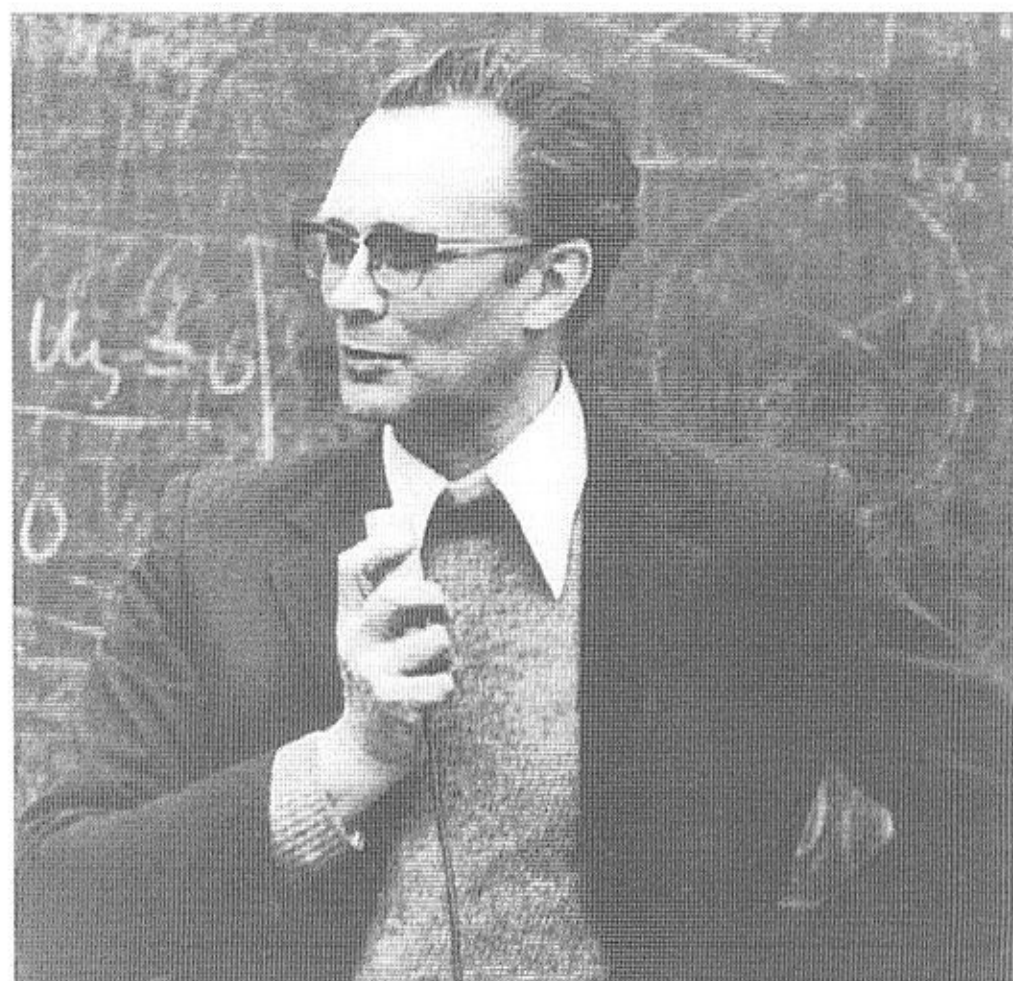
С.Т. Беляев, Новосибирск, 1970-е годы
(фотоархив С.Т. Беляева)



С.Т. Беляев и А.Б. Мигдал, Москва, 1970-е годы
(фотоархив С.Т. Беляева)



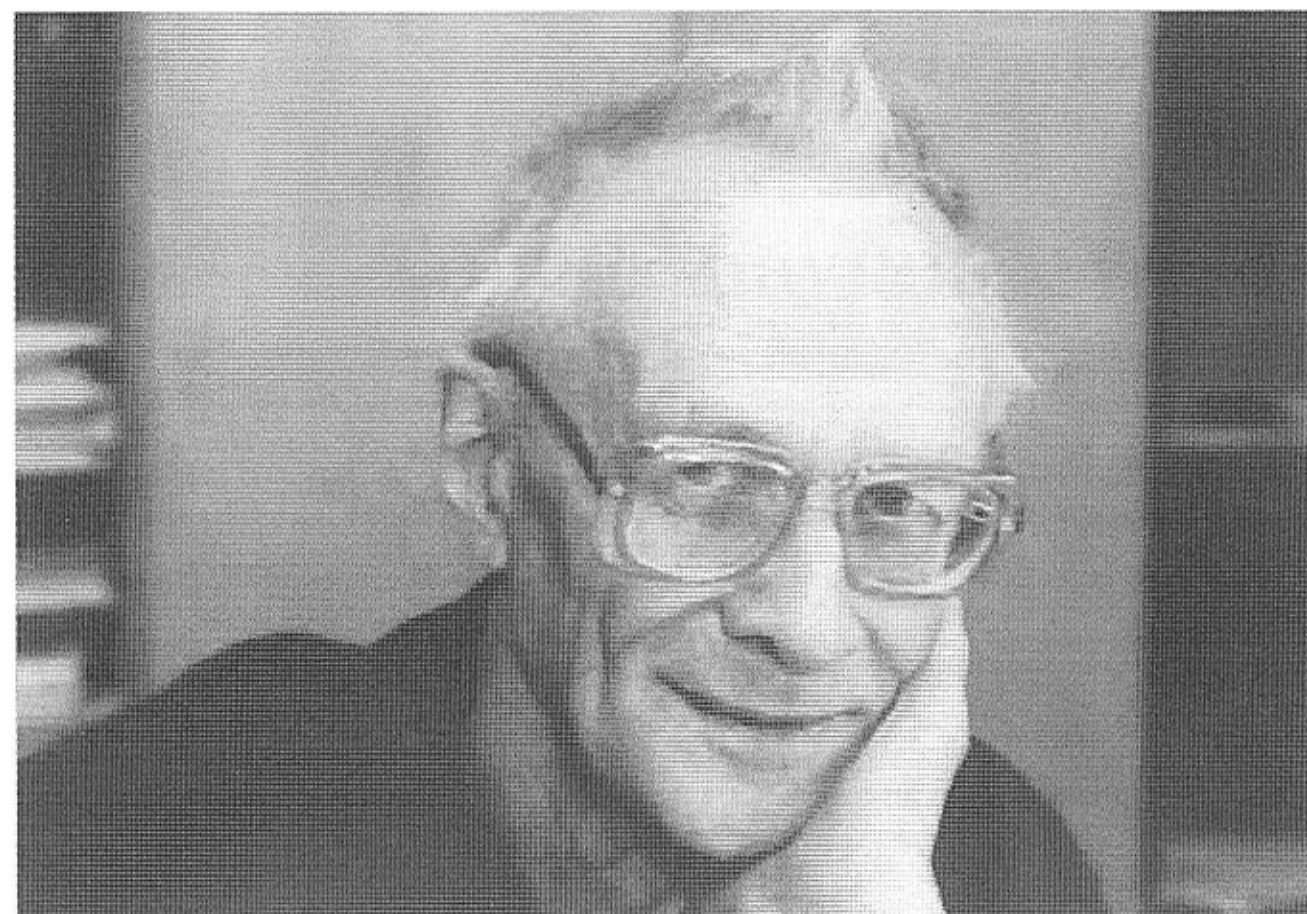
А.П. Александров и С.Т. Беляев, Москва, начало 1980-х годов
(фотоархив С.Т. Беляева)



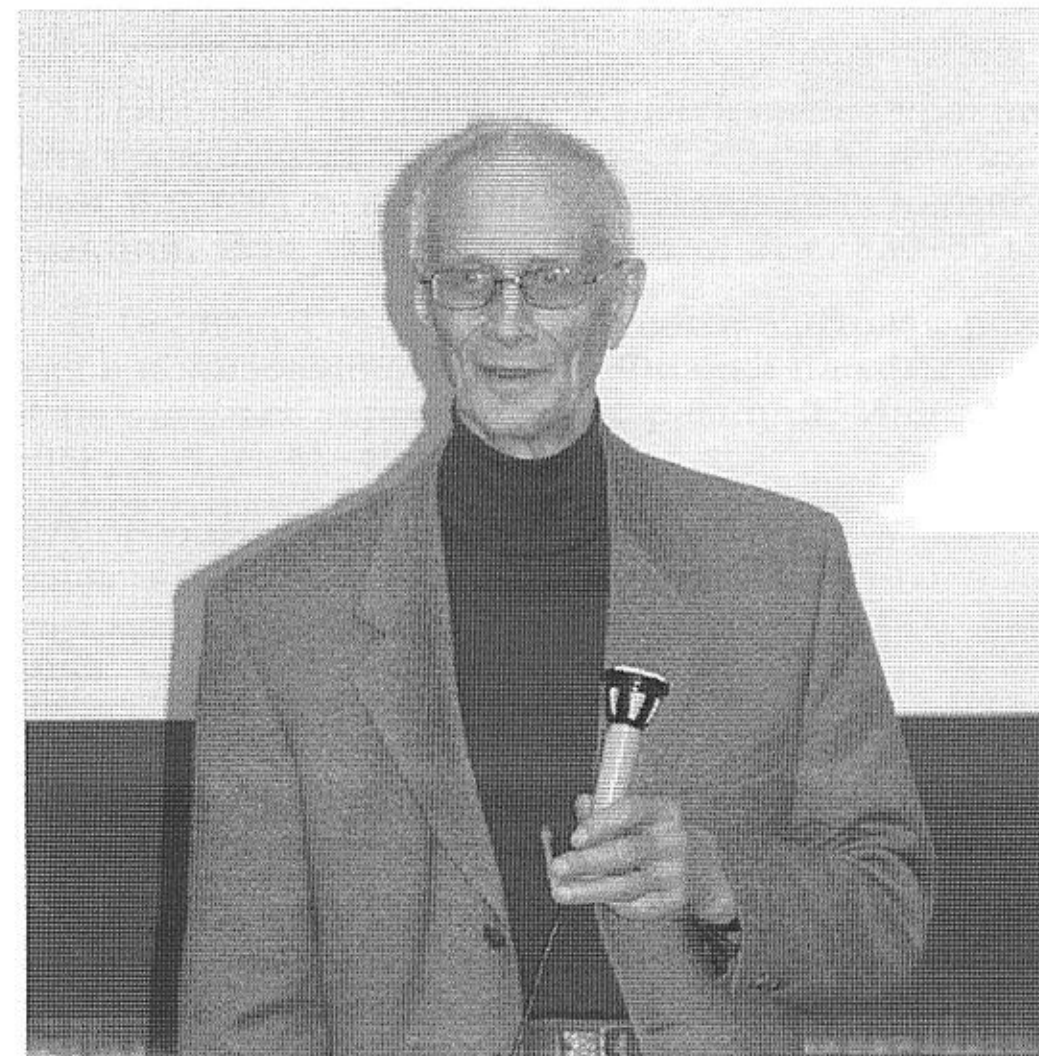
С.Т. Беляев, Новосибирск, 1970-е годы
(автор снимка В. Коротаева, фотоархив С.Т. Беляева)



С.Т. Беляев с коллегами, Чернобыль, конец 1980-х годов
(фотоархив С.Т. Беляева)



С.Т. Беляев, Москва, 2000-е годы (фотоархив С.Т. Беляева)



С.Т. Беляев, Москва, 2000-е годы (фотоархив С.Т. Беляева)

Список научных работ

В списке шрифтом выделены "избранные научные работы", тексты которых размещены на диске, прилагаемом к книге.

1. С.Т. Беляев. Оптимальная интенсивность пучка частиц в циклотроне. — Отчёт ИАЭ N 585-А, 1951, 69 с. (дипломная работа).
2. С.Т. Беляев, Г.И. Будкер. Релятивистское кинетическое уравнение. — Доклады Академии наук СССР, 1956, т. 107, с. 807–810.
3. С.Т. Беляев, Г.И. Будкер. Релятивистская плазма в переменных полях. — Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, 1958, т. 2, с. 283–329.
4. С.Т. Беляев, Г.И. Будкер. Кинетическое уравнение для электронного газа при редких столкновениях. — Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, 1958, т. 2, с. 330–354.
5. С.Т. Беляев, Г.И. Будкер. Многоквантовая рекомбинация в ионизованном газе. — Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, 1958, т. 3, с. 41–49.
6. С.Т. Беляев. Кинетическое уравнение в разреженных газах в сильных полях. — Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, 1958, т. 3, с. 50–65.
7. С.Т. Беляев. Кинетика ионизованного газа в сильном магнитном поле. — Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, 1958, т. 3, с. 66–85.
8. Б.П. Адъяевич, С.Т. Беляев, Е.К. Завойский, Ю.П. Полунин. Источники поляризованных ядер для ускорителей. — Ядерные реакции при малых и средних энергиях, Изд. АН СССР, 1958, с. 87–92.

9. С.Т. Беляев. Применение методов квантовой теории поля к системе Бозе-частиц. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1958, т. 34, с. 417–432.
10. С.Т. Беляев. Энергетический спектр неидеального Бозе-газа. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1958, т. 34, с. 433–446.
11. S.T. Belyaev. Effect of pairing correlations on collective nuclear properties. — In: *Compt. Rend. Congres Int. Phys. Nucl. (Paris)*, 1959, p. 713–717.
12. S.T. Belyaev. Effect of pairing correlations on nuclear properties. — *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, 1959, v. 31, N. 11, 55 p.
13. S.T. Belyaev. Introduction to the Bogoliubov canonical transformation method. — In: *The many body problem (DUNOD, Paris)*, 1959, p. 343–375 (lectures on physical summer school, France, 1958; лекции на летней школе физиков, Лезуш, Франция, 1958).
14. S.T. Belyaev. Application of canonical transformation method to nuclei. — In: *The many body problem (DUNOD, Paris)*, 1959, p. 377–400 (lectures on physical summer school, France, 1958; лекции на летней школе физиков, Лезуш, Франция, 1958).
15. S.T. Belyaev. Extension of diagram technique of field theory to Fermi systems with pairing phenomenon (with application to spherical nuclei). — *Physica*, 1960, v. 26, p. 181–187 (Report on the Congress on Many Particle Problems, Utrecht, 1960).
16. S.T. Belyaev. On the nature of the first $2+$ state in even-even spherical nuclei. — In: *Proc. Int. Conf. Nucl. Structure (Kingston)*, 1960, 2 p.
17. С.Т. Беляев. О природе первых возбужденных состояний чётно-нечётных сферических ядер. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1960, т. 39, с. 1387–1400.
18. С.Т. Беляев. К вопросу о вычислении момента инерции ядер. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1961, т. 40, с. 672–675.
19. S.T. Belyaev. Concerning the calculation of the nuclear moment of inertia. — *Nuclear Physics*, 1961, v. 24, p. 322–325.
20. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Ангармонические эффекты колебаний сферических ядер. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1962, т. 42, с. 1590–1603.

21. S.T. Belyaev, V.G. Zelevinsky. Anharmonic effects of quadrupole oscillations of spherical nuclei. — *Nuclear Physics*, 1962, v. 39, p. 582–604.
22. S.T. Belyaev. Some aspects of collective properties of nuclei. — In: *Selected Topics in Nuclear Theory (International Atomic Energy Agency, Vienna)*, 1963, p. 291–341.
23. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Ангармоничность колебаний сферических ядер. — *Известия АН СССР, сер. физ.*, 1964, т. 28, вып. 1, с. 127–133.
24. S.T. Belyaev, V.G. Zelevinsky. On the nature of low excitations in the odd-A spherical nuclei. — In: *Compt. Rend. Congres Int. Phys. Nucl. (Paris, 1964, July 2-8)*, 1964, Vol. 2, p. 661–662.
25. S.T. Belyaev. A new derivation of nuclear collective Hamiltonian. — In: *Compt. Rend. Congres Int. Phys. Nucl. (Paris, 1964, July 2-8)*, 1964, Vol. 2, p. 663–665.
26. С.Т. Беляев. Нуклон-фононный гамильтониан для сферических ядер. — *Ядерная физика*, 1965, т. 1, с. 3–12.
27. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Об энергетическом спектре нечётных сферических ядер. — *Ядерная физика*, 1965, т. 1, с. 13–26.
28. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Функция Грина и вероятности переходов в нечётных ядрах. — *Ядерная физика*, 1965, т. 2, с. 51–58.
29. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Метод функций Грина в простой ядерной модели. — *Ядерная физика*, 1965, т. 2, с. 615–634.
30. S.T. Belyaev. Time-dependent self-consistent field and collective nuclear Hamiltonian. — *Nuclear Physics*, 1965, v. 64, p. 17–54.
31. С.Т. Беляев, Б.А. Румянцев. Структура коллективной кинетической энергии в простой микроскопической модели ядра. — *Ядерная физика*, 1966, т. 3, с. 234–244.
32. S.T. Belyaev. *Collective Excitations in Nuclei*. — *Many-Body Problems and Other Selected Topics in Theoretical Physics*, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1966. 74 p.; Series “Documents on Modern Physics”, Gordon and Breach, Science Publishers, New York, 1968. 74 p. (Lectures of the Latin American School of Physics, University of Mexico, July–August 1963).

33. С.Т. Беляев. Когерентные флуктуации спаривания и коллективные $0+$ возбуждения ядер. — *Ядерная физика*, 1966, т. 4, с. 936–951.
34. S.T. Belyaev, B.A. Romyantsev. Collective $0+$ excitations in deformed nuclei. — In: Proc. Int. Conf. Nucl. Structure (Tokyo), 1967, p. 125–128.
35. S.T. Belyaev. The microscopic models of collective excitations. Present status and possible ways of improvement. — In: Nuclear structure (International Atomic Energy Agency, Vienna), 1968, p. 155–168.
36. S.T. Belyaev. Effective two body forces in nuclei and gauge invariance. — *Physics Letters*, 1969, v. 28B, p. 365–367.
37. S.T. Belyaev, B.A. Rumyantsev. Spin-orbit vibrations in nuclei. — *Physics Letters*, 1969, v. 30B, p. 444–445.
38. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Вращение как внутреннее возбуждение ядра. — *Ядерная физика*, 1970, т. 11, с. 741–759.
39. S.T. Belyaev, G.I. Budker, S.G. Popov. The possibility of using storage rings with internal thin targets. — In: High Energy Physics and Nuclear Structure (Proc. of the 3-d Int. Conf., New York, 1969, Sept. 8–12), Plenum Press, New York, 1970, p. 606.
40. С.Т. Беляев, Б.А. Румянцев. Коллективные $0+$ состояния в деформированных ядрах. — Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1970, N 1-70, 31 с.
41. С.Т. Беляев, Б.А. Румянцев. Симметрия эффективных полей в ядрах. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1970, N 85-70, 16 с.
42. С.Т. Беляев. Коллективные низколежащие состояния ядер. Возможности теоретических моделей. — В кн.: *Проблемы современной физики*, М.: Наука, 1972, с. 129–141.
43. С.Т. Беляев. Развитие микроскопической теории коллективных возбуждений. — Структура ядра (Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 13–18 апреля 1972 г.), Дубна, ОИЯИ, 1972, с. 491–525.
44. S.T. Belyaev. Collective excitations and their microscopic models. — In: Developments and borderlines of nuclear physics (LIII Corso), Academic Press Inc., New York, 1972, p. 60–86.
45. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Метод обобщённой матрицы плотности в теории коллективных возбуждений. — *Ядерная физика*, 1972, т. 16, с. 1195–1208.

46. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Вращательные возбуждения ядер в методе обобщённой матрицы плотности. — *Ядерная физика*, 1973, т. 17, с. 525–534.
47. С.Т. Беляев, Б.А. Румянцев. Об одном возможном механизме предравновесной эмиссии. — Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1974, N 74–65, 9 с.
48. S.T. Belyaev, B.A. Romyantsev. Splashing out — A possible mechanism of preequilibrium emission. — *Physics Letters B*, 1974, v. 53, p. 6–8.
49. С.Т. Беляев, И.М. Павличенков. Обобщённая матрица плотности в модели Липкина. — Препринт ИАЭ-3469/2, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1981.
50. S.T. Belyaev, I.M. Pavlichenkov. The generalized density matrix in the Lipkin model. — *Nuclear Physics A*, 1982, v. 388, p. 505–524.
51. С.Т. Беляев, И.М. Павличенков, Ю.Ф. Смирнов. Модель Эллиота для произвольной оболочки: низшие коллективные мультиплеты и обобщённая матрица плотности. — Препринт ИАЭ-3994/2, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1984.
52. S.T. Belyaev, I.M. Pavlichenkov, Yu.F. Smirnov. A study of the generalized density matrix in the SU(3) model of Elliott for an arbitrary oscillator n-shell. — *Nuclear Physics A*, 1985, v. 441, p. 33–56.
53. S.T. Belyaev. The lessons of Niels Bohr. — *Impact of Science on Society*, 1985, No. 137, p. 39–49.
54. С.Т. Беляев, В.Г. Зелевинский. Нильс Бор и физика атомного ядра. — *Успехи физических наук*, 1985, т. 147, вып. 2, с. 210–251.
55. С.Т. Беляев, А.В. Смирнов, С.В. Толоконников, С.А. Фаянс. Спаривание в атомных ядрах в координатном представлении. — *Ядерная физика*, 1987, т. 45, с. 1263–1278.
56. А.Л. Барабанов, С.Т. Беляев. О некоторых проблемах ядерных реакций с нейтронами. — *Нейтронная физика* (Материалы международной конференции по нейтронной физике, Киев, 1987), т. 1, М.: ЦНИИАтоминформ, 1988, с. 8–22.
57. С.Т. Беляев, Ю.К. Краснов, А.П. Платонов. О разряде крупных сверхпроводящих электромагнитных систем. — Препринт ИАЭ-4891/1, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1989.

58. С.Т. Беляев, Ю.К. Краснов. Энергия сингулярного вихря в идеальной жидкости. — Препринт ИАЭ-4970/1, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1989.
59. С.Т. Беляев и др. Фотоядерные эксперименты на накопителе электронов «Сибирь-2». — Препринт ИАЭ-5046/2, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990.
60. С.Т. Беляев, А.А. Боровой, Ю.Л. Добрынин. Информационная система «ПРОБА»: контроль радиационных загрязнений территории после аварии на Чернобыльской АЭС. — Атомная Энергия, 1990, т. 68, с. 197–201.
61. С.С. Абалин, С.Т. Беляев, А.А. Боровой и др. Диагностические исследования разрушенного реактора в Чернобыле. — Атомная энергия, 1990, т. 68, с. 355–359.
62. С.Т. Беляев. Предисловие к Докладу Международного консультативного комитета «Международный чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер». — М.: Издат, 1991, с. 3–10.
63. С.Т. Беляев, Ю.К. Краснов. Частицеподобные возбуждения в вязких жидкостях. — Доклады АН СССР, 1991, т. 318, с. 1362.
64. С.Т. Беляев, Ю.К. Краснов. О массе частицеподобных возбуждений в жидкостях. — Доклады АН СССР, 1991, т. 319, с. 150.
65. A. Balysh, M. Beck, S.T. Belyaev et al. The Heidelberg-Moscow double beta decay experiment with enriched ^{76}Ge . First Results. — Physics Letters B, 1992, v. 283, p. 32–36.
66. M. Beck, J. Bockholt, ... S.T. Belyaev et al. New half life limits for the $\beta\beta$ ($2\nu + 0\nu$) decay of ^{76}Ge to the excited states of ^{76}Se from the Heidelberg-Moscow experiment. — Z. Phys. A, 1992, v. 343, p. 397–400.
67. A. Balysh, M. Beck, S.T. Belyaev et al. New experimental limits for electron decay and charge conservation. — Physics Letters B, 1993, v. 298, p. 278–282.
68. M. Beck, F. Bensch, ... S.T. Belyaev et al. Investigation of the Majoron-accompanied double-beta decay mode of ^{76}Ge . — Physical Review Letters, 1993, v. 70, p. 2853–2855.
69. M. Beck, F. Bensch, ... S.T. Belyaev et al. The Heidelberg-Moscow double beta decay experiment using enriched ^{76}Ge . — Annals of the New York Academy of Sciences, 1993, v. 688, p. 509–514.
70. F. Petry, A. Piepke, ... S.T. Belyaev et al. Background recognition in Ge detectors by pulse shape analysis. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1993, v. 332, p. 107–112.
71. С.Т. Беляев и др. Фотоядерные реакции с малой передачей энергии и импульса. — Препринт ИАЭ-5726/2, Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1994.
72. A. Balysh, M. Beck, S.T. Belyaev et al. Measurement of the $\beta\beta$ 2ν decay of ^{76}Ge . — Physics Letters B, 1994, v. 322, p. 176–181.
73. M. Beck, F. Bensch, ... S.T. Belyaev et al. Searching for dark matter with the enriched Ge detectors of Heidelberg-Moscow $\beta\beta$ experiment. — Physics Letters B, 1994, v. 336, p. 141–146.
74. S.D. Barthelmy, L.M. Bartlett, ... S.T. Belyaev et al. GRIS background reduction results using isotopically enriched Ge. — Astrophysical Journal, 1994, v. 427, p. 519–521.
75. A. Balysh, M. Beck, S.T. Belyaev et al. Sub-eV limit for the neutrino mass from ^{76}Ge double beta decay by the Heidelberg-Moscow experiment. — Physics Letters B, 1995, v. 356, p. 450–455.
76. **S.T. Belyaev, V.G. Stankevitch. Kurchatov synchrotron radiation source status report. — Review of Scientific Instruments, 1995, v. 66, p. 2358–2361.**
77. S.T. Belyaev, V.F. Demin, V.A. Kutkov et al. Characteristics of the development of the radiological situation resulting from the accident, intervention and countermeasures. — In: The radiological consequences of the Chernobyl accident (Proc. Int. Conf., Minsk, Belarus, 1996, March 18–22), p. 19–28.
78. P. Hedemann-Jensen, S.T. Belyaev, V.F. Demin et al. Management of contaminated territories: radiological principles and practice. — In: The radiological consequences of the Chernobyl accident (Proc. Int. Conf., Minsk, Belarus, 1996, March 18–22), p. 325–338.
79. M. Gunther, J. Hellmig, ... S.T. Belyaev et al. Bounds on new Majoron models from the Heidelberg-Moscow experiment. — Physical Review D, 1996, v. 54, p. 3641–3644.
80. L. Baudis, M. Gunther, ... S.T. Belyaev et al. The Heidelberg-Moscow experiment: Improved sensitivity for ^{76}Ge neutrinoless double beta decay. — Physics Letters B, 1997, v. 407, p. 219–224.
81. M. Gunther, J. Hellmig, ... S.T. Belyaev et al. Heidelberg-Moscow $\beta\beta$ experiment with ^{76}Ge : Full setup with five detectors. — Physical Review D, 1997, v. 55, p. 54–67.
82. С.Т. Беляев, В.Ф. Демин, В.С. Осмачкин. Чернобыльская авария: критический анализ последствий и проведенных защитных мероприятий. — Атомная энергия, 1997, т. 83, с. 393–401.

83. S.T. Belyaev. Development of the Radiological Situation Following the Chernobyl Accident and Political and Social Response to it. — In: Proc. of the Int. Radiological Post-Emergency Response issues Conf., Washington D.C., Sept. 9–11, 1998, EPA: United States Environment Protection Energy, p. 82–86.
84. А.М. Бакаляров, А.Я. Балыш, С.Т. Беляев, В.И. Лебедев. Использование искусственных нейронных сетей для разделения событий по форме импульса. — Препринт ИАЭ-6089/2, Москва, РНЦ «Курчатовский институт», 1998.
85. L. Baudis, J. Hellmig, ... S.T. Belyaev et al. New limits on dark-matter weakly interacting particles from the Heidelberg-Moscow experiment. — *Physical Review D*, 1999, v. 59, 022001 (5 p.).
86. L. Baudis, A. Dietz, ... S.T. Belyaev et al. Limits on the Majorana neutrino mass in the 0.1 eV range. — *Physical Review Letters*, 1999, v. 83, p. 41–44.
87. С.С. Арзуманов, С.Т. Беляев, Л.Н. Бондаренко и др. Кластерная структура поверхности вещества как причина эффекта селективного усиления захвата ультрахолодных нейтронов при подбарьерном отражении. — *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1999, т. 115, с. 126–140.
88. А.Л. Барабанов, С.Т. Беляев. К вопросу о потенциале взаимодействия ультрахолодных нейтронов с веществом. — *Ядерная физика*, 1999, т. 62, с. 824–831.
89. S.T. Belyaev, A.L. Barabanov. Interaction of ultra-cold neutrons with condensed matter. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, v. 440, p. 704–708.
90. A.L. Barabanov, S.T. Belyaev. Multiple scattering theory for slow neutrons (from thermal to ultracold). — *European Physical Journal B*, 2000, v. 15, p. 59–75.
91. S.T. Belyaev, V.G. Stankevitch, A.N. Artemiev. Kurchatov synchrotron radiation source: status report. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, v. 448, p. 1–7.
92. S.T. Belyaev, V.F. Demin, V.A. Kutkov, B.I. Yatsalo. Analysis of necessity and efficiency of defence measures in territories contaminated after Chernobyl accident. — In: Radioactivity induced by nuclear explosions and accidents (Proc. Int. Conf., Moscow, 2000, April 24–26), S.-Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000, v. 3, p. 275–280.
93. S.T. Belyaev. Decision process followed by the USSR up to 1991 and analysis of the main restoration activities. — In: Nuclear Safety and the Environment. (Proc. of the Workshop on restoration strategies for contaminated territories resulting from the Chernobyl accident. Compiled by L. Cecille.), DG Environment of the European Commission, Brussels (Belgium), EUR 18193 EN, November 2000.
94. H.V. Klapdor-Kleingrothaus, A. Dietz, ... S.T. Belyaev et al. Latest results from the Heidelberg-Moscow double beta decay experiment. — *European Physical Journal A*, 2001, v. 12, p. 147–154.
95. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Centrality dependence of charged particle multiplicity in Au-Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2001, v. 86, p. 3500–3505.
96. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Measurement of the midrapidity transverse energy distribution from $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV Au+Au collisions at RHIC. — *Physical Review Letters*, 2001, v. 87, 052301 (6 p.).
97. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 88, 022301 (6 p.).
98. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Transverse-mass dependence of two-pion correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 88, 192302 (6 p.).
99. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Measurement of single electrons and implications for charm production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 88, 192303 (6 p.).
100. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Centrality dependence of π^\pm , K^\pm , p , and $p\bar{p}$ production from $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV Au + Au collisions at RHIC. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 88, 242301 (6 p.).
101. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Event-by-event fluctuations in mean p_T and mean e_T in $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV Au+Au collisions. — *Physical Review C*, 2002, v. 66, 024901 (10 p.).
102. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Net charge fluctuations in Au+Au interactions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 89, 082301 (6 p.).

103. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Measurement of Λ and $\Lambda\bar{\Lambda}$ particles in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 89, 092302 (6 p.).
104. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Flow measurements via two-particle azimuthal correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physical Review Letters*, 2002, v. 89, 212301 (6 p.).
105. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Overview of PHENIX results from the first RHIC run. — *Nuclear Physics A*, 2002, v. 698, p. 39c–53c.
106. S.T. Belyaev. Are quantum wave packets observable? Sokolov effect: puzzling generation of $2p$ states in the $2s$ hydrogen beam passing through a wide metal slit. — *European Physical Journal D*, 2003, v. 25, p. 247–252.
107. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Centrality dependence of the high p_T charged hadron suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. — *Physics Letters B*, 2003, v. 561, p. 82–92.
108. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Single identified hadron spectra from $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV Au+Au collisions. — *Physical Review C*, 2004, v. 69, 024904 (29 p.).
109. K. Adcox, S.S. Adler, ... S.T. Belyaev et al. PHENIX Collaboration. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. — *Nuclear Physics A*, 2005, v. 757, p. 184–283.
110. S. Schonert, I. Abt, ... S.T. Belyaev et al. The GERmanium Detector Array (Gerda) for the search of neutrinoless $\beta\beta$ decays of ^{76}Ge at LNGS. — *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2005, v. 145, p. 242–245.
111. A.L. Barabanov, S.T. Belyaev. Bulk effects in the coherent inelastic scattering of ultracold neutrons. — *European Physical Journal A*, 2006, v. 27, p. 105–127.
112. S.T. Belyaev. Many-body physics and spontaneous symmetry breaking. — *Series on Advances in Quantum Many-Body Theory (Proceedings of the 12th International Conference “Recent Progress in Many-Body Theories”*, Eds. J.A. Carlson and G. Ortiz), World Scientific, 2006, v. 9, p. 13–24; *International Journal of Modern Physics B*, 2006, v. 20, p. 2579–2590.

113. S. Schonert, I. Abt, ... S.T. Belyaev et al. Status of the Germanium Detector Array (GERDA) in the search of neutrinoless $\beta\beta$ decays of ^{76}Ge at LNGS. — *Ядерная физика*, 2006, т. 69, с. 2146–2153.
114. С.Т. Беляев. Что стимулирует развитие теоретической физики. Доклад лауреата Большой золотой медали им. М.В. Ломоносова 2010 года. — *Вестник Российской Академии наук*, 2011, т. 81, вып. 10, с. 900–907.