



А. И. Алиханов

УДК 530.1(092)

ОТ ФИЗИКИ ЛУЧЕЙ РЕНТГЕНА  
ДО ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ  
(К 100-летию со дня рождения  
академика А. И. Алиханова)

*Ю. Г. Абов*

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Излагается научная биография известного физика-экспериментатора Абрама Исааковича Алиханова (1904–1970). Подробно рассматриваются периоды его работы в Ленинградском физико-техническом институте (1927–1941) и в Институте теоретической и экспериментальной физики — научном центре, основателем и директором (1945–1968) которого был А. И. Алиханов и который ныне носит его имя.

Discussing the renowned experimental physicist A. I. Alikhanov's (1904–1970) contribution to science, the paper offers an exhaustive analysis of his work at the Leningrad Physics and Technology Institute (1927–1941) as well as at the Institute for Theoretical and Experimental Physics (Moscow) — the scientific centre that was founded by A. I. Alikhanov in 1945, headed by him from 1945 to 1968, and now bears his name.

Абрам Исаакович Алиханов родился 4 марта 1904 г. в г. Елизаветполе (впоследствии Кировабаде, Азербайджан). Среднее образование он получил в Тифлисе, а высшее — в Ленинграде, где он окончил Ленинградский политехнический институт. В 1927 г. А. И. Алиханов был принят на работу в Ленинградский физико-технический институт (ЛФТИ), основателем и директором которого был академик Абрам Федорович Иоффе. Основной тематикой исследований ЛФТИ была (и остается поныне) физика твердого тела. В частности, большое внимание уделялось проблеме старения материалов. К решению данной задачи подключился молодой А. И. Алиханов, используя для этой цели рассеяние рентгеновых лучей (РЛ). Однако затем его интересы изменились, и он обратился к исследованиям оптических свойств самих рентгеновых лучей. Вместе с Л. А. Арцимовичем А. И. Алиханов в течение ряда лет (1930–1933 гг.) выполнил серию экспериментов, в которых очень тщательно был исследован процесс полного отражения рентгеновых лучей. Явление преломления рентгеновых лучей было рассмотрено уже в первых, классических работах Дарвина и Эвальда [1, 2], посвященных теории динамической дифракции рентгеновых лучей. Явление преломления РЛ впервые

было обнаружено именно при прецизионном изучении дифракции РЛ. Было показано, что в отличие от обычной (световой) оптики коэффициент преломления РЛ на границе вакуум–вещество (луч падает из воздуха на поверхность вещества) меньше единицы. Это означает, что вакуум для РЛ является более плотной оптической средой, чем вещество (конденсированное состояние вещества). Вспомним соотношение Брэгга–Вульфа

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad (1)$$

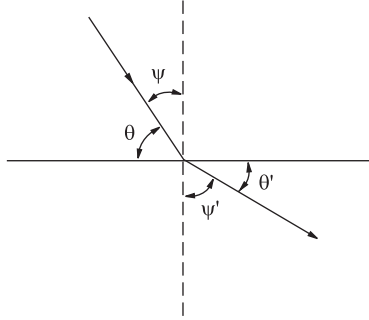


Рис. 1. Преломление лучей при переходе из оптически более плотной среды в мягкую. Коэффициент преломления  $n < 1$

здесь  $d$  — межплоскостное расстояние;  $\theta$  — угол скольжения (дополнительный угол к углу падения (см. рис. 1));  $m$  — порядок отражения;  $\lambda$  — длина волны излучения. Из соотношения (1) следует, что, фиксируя длину волны  $\lambda$ , мы фиксируем отношение  $\lambda/2d$ , оно не должно зависеть от числа  $m$ :  $\lambda/2d = \text{const}$ . Опыт показал, что это не так. По определению показатель, или коэффициент, преломления равен отношению синусов углов падения и преломления или косинусов соответствующих им дополнительных углов (см. рис. 1). Если показатель преломления меньше единицы, т. е.  $n = 1 - \delta$ , то получим

$$n = \frac{\sin \psi}{\sin \psi'} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta'} = 1 - \delta. \quad (2)$$

Положительная величина  $\delta$  очень мала:  $\delta \sim 10^{-6}$ . Используя формулы (1) и (2), нетрудно получить

$$m\lambda = 2d \sin \theta \left( 1 - \frac{4d^2\delta}{m^2\lambda^2} \right). \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что  $\lambda/2d \neq \text{const}$ . Измеряя углы отражения (или скольжения) для разных порядков  $m_1$  и  $m_2$ , получаем

$$\delta = \left( \frac{\sin \theta_{m_1}}{m_1} + \frac{\sin \theta_{m_2}}{m_2} \right) / \left( \frac{1}{m_1 \sin \theta_{m_1}} - \frac{1}{m_2 \sin \theta_{m_2}} \right). \quad (4)$$

Таким образом, можно определить  $\delta$  и показатель преломления  $n$ . Сводку результатов измерений показателя преломления можно найти в монографии А. И. Алиханова [3], которую рекомендуем читателям, интересующимся историей рентгенооптических исследований. Дифракционный метод измерения

показателя преломления  $n$ , по понятным причинам, не получил широкого распространения. В подавляющем числе случаев для измерения показателя преломления РЛ был использован другой метод — метод полного отражения. Поскольку преломленный луч с уменьшением угла скольжения  $\theta$  (см. рис. 1) приближается к поверхности, т. е. к границе раздела сред вакуум–вещество, то при некотором значении этого угла  $\theta = \theta_{\text{кр}}$  преломленный луч вообще не входит внутрь вещества, т. е.  $\theta' = 0$ . При дальнейшем уменьшении  $\theta$  оба луча, падающий и отраженный, оказываются в вакууме, по одну сторону от вещества. Это явление в оптике называют полным внутренним отражением. В данном случае следует говорить о полном внешнем отражении. Будем далее использовать термин «полное отражение». Из формулы (2) следует

$$n = \cos \theta_{\text{кр}} = 1 - \delta,$$

$\theta_{\text{кр}}$  имеет величину порядка нескольких угловых минут. Измерение критического угла  $\theta_{\text{кр}}$  дает значение показателя преломления  $n$ . Метод пригоден как для твердых поликристаллических образцов, так и для жидкостей. В обычной оптике процесс полного отражения вполне адекватно описывается формулами Френеля. При отсутствии поглощения излучения коэффициент отражения, т. е. отношение интенсивностей отраженного  $J_r$  и падающего  $J_0$  излучения, равен

$$R = \frac{J_r}{J_0} = \left( \frac{\sqrt{\theta^2 + 2(n-1)} - \theta}{\sqrt{\theta^2 + 2(n-1)} + \theta} \right)^2. \quad (5)$$

В формуле (5) принято  $\sin \theta = \theta$  ввиду малости углов скольжения. Полагая  $n = 1 - \delta$ , получаем

$$R = \frac{J_r}{J_0} = \left( \frac{\sqrt{\theta^2 + 2\delta} - \theta}{\sqrt{\theta^2 + 2\delta} + \theta} \right)^2. \quad (6)$$

Формула (6) предполагает не только отсутствие поглощения излучения в веществе, но и идеально ровную (плоскую) и однородную отражающую среду. Поскольку длина волны РЛ на три порядка меньше, чем длины волн в оптике, казалось бы, требования становятся практически невыполнимыми. Но это не так. Всякая шероховатость или неоднородность в оптике страшна той дополнительной разностью хода (разностью фаз), которую она вносит. Ввиду малости  $\delta \sim 10^{-6}$ , т. е. близости  $n$  к единице, оказывается, что требования к отражающим зеркалам возрастают не столь драматично. При наличии поглощения коэффициент преломления становится комплексным:

$$n = 1 - \delta - \eta i.$$

Вместо формулы (6) получим

$$R = \frac{J_r}{J_0} = \left( \frac{\sqrt{\theta^2 + 2\delta - 2\eta i} - \theta}{\sqrt{\theta^2 + 2\delta - 2\eta i} + \theta} \right)^2. \quad (7)$$

Из формулы (2) или (4) легко получить значение критического угла скольжения

$$\theta_{\text{кр}} = \sqrt{2\delta}.$$

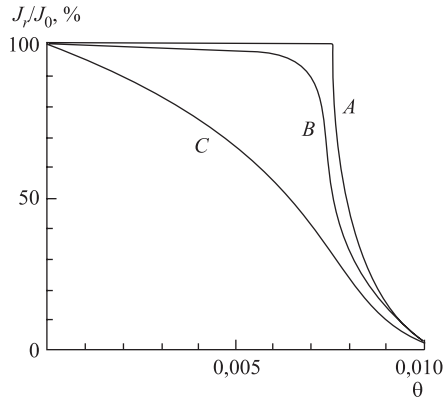


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от угла скольжения: кривая А — поглощение излучения отсутствует, кривые В и С демонстрируют возрастание поглощения

Поэтому из формулы (6) следует, что при  $\theta \leq \theta_{\text{кр}}$  коэффициент отражения  $R = J_r/J_0$  равен единице. При  $\theta = \theta_{\text{кр}}$  коэффициент отражения резко падает, как это условно изображено на рис. 2 (кривая А). Таким образом, при отсутствии поглощения не очень трудно определить критический угол из экспериментальных данных и получить значения показателя преломления. Однако наличие поглощения приводит к тому, что кривые отражения становятся все более плавными и определение критического угла из экспериментальных данных становится затруднительным, а затем и вовсе невозможным (кривые В и С на рис. 2). Коэффициент преломления в этих случаях можно

найти, сравнивая расчетные и экспериментальные кривые. Но тогда нужно быть уверенным в том, что формулами Френеля можно пользоваться в оптике рентгеновых лучей. В двадцатые годы было выполнено много экспериментальных исследований в этом направлении (см. монографию [3]), но однозначного ответа получено не было. Возникла необходимость исследовать процесс полного отражения более детально. С этой целью приступили к изучению полного отражения рентгеновых лучей тонкими слоями вещества. В процессе полного отражения РЛ интенсивность первичного излучения должна экспоненциально падать. Исследуя зависимость  $J_r$  — интенсивности отраженного излучения — от толщины слоя, можно определить глубину проникновения РЛ в вещество: при достижении определенной толщины  $J_r$  перестает изменяться. Экспериментальные данные нужно было сравнивать с расчетными. Однако полученные экспериментальные данные также не удавалось интерпретировать однозначно. Это объясняется целым рядом причин. В большинстве случаев использовали немонахроматическое излучение, что увеличивало

интенсивность, но затрудняло определение критического угла. Для регистрации отраженного пучка использовали фотографический метод, часто даже без фотометрии. Это исключало возможность производить точные количественные измерения коэффициента отражения. Толщина слоев определялась недостаточно точно. При использовании катодного распыления для получения тонких пленок вследствие нагрева начинался процесс локальной кристаллизации в слое, что увеличивало шероховатость и неоднородность плотности. Плотность тонкого слоя могла существенно отличаться от табличного значения и т. д.

Так вкратце можно охарактеризовать ситуацию, в которой А. И. Алиханов и Л. А. Арцимович в 1930 г. начали свои исследования в этой области.

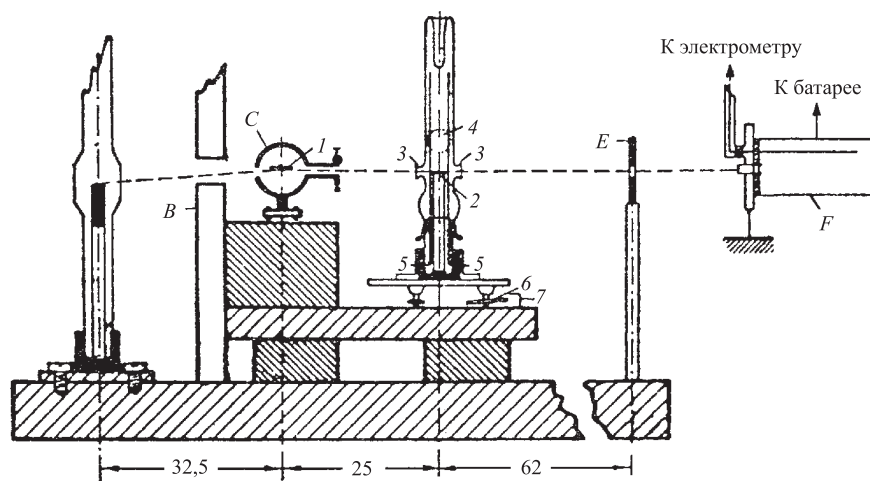


Рис. 3. Установка для исследования полного отражения РЛ от тонких слоев вещества: *B* — защитная стенка, отделяющая установку от рентгеновской трубки; *C* — камера, в которой укреплен кристалл-монокроматор; *E* — щель, отсекающая пучок, прошедший мимо пластинки; *F* — ионизационная камера; *1* — кристалл-монокроматор (кальций); *2* — стеклянная пластинка-подложка; *3* — два окошка для впуска и выпуска РЛ, закрытые тонкой алюминиевой фольгой; *4* — шлиф; *5* — молибденовые вводы для системы испарителей; *6* — регулировочные винты для вращения стеклянной пластинки; *7* — шкала, одно деление которой соответствует повороту стеклянной пластинки на угол  $0,08'$

Установка А. И. Алиханова и Л. А. Арцимовича (см. рис. 3) [4] выгодно отличалась от установок их предшественников. За рентгеновской трубкой с молибденовым антикатодом располагалась камера с монокристаллом. Камера позволяла осуществлять вращение кристалла-монокроматора. Выделяли линию  $\text{MoK}\alpha_1$ . Отраженный пучок проходил через диафрагму, положение

и ширину которой можно было изменять. При ширине диафрагмы 0,1 мм угловая ширина линии  $\text{MoK}\alpha_1$  составляла 20 угловых секунд. Далее на пучке располагалась вакуумная камера, внутри которой на специальном поворотном устройстве крепилась оптически полированная стеклянная пластинка длиной 4 см. Эта пластинка служила подложкой, на которую методом испарения наносили слои исследуемых образцов. Пластинку можно было смещать нормально к пучку и поворачивать вокруг горизонтальной оси. Угловое положение пластинки (зеркало) фиксировали с точностью лучше  $5''$ . Оригинальная испарительная установка, расположенная в той же самой вакуумной камере, позволяла получать самые тонкие (даже моноатомные) слои исследуемых веществ с высокой однородностью. Для тонких слоев изменение толщины пленки от центра пластинки к краям не превосходило 8%. Для толстых слоев оно составляло  $20 \div 25\%$ . Толщину слоев определяли достаточно точно по количеству испаренного материала. За вакуумной камерой располагалась вторая щель, регулируя положение и ширину которой полностью отсекали прямой пучок — часть пучка, проходившую мимо пластинки. Учитывали изменение поперечного сечения пучка, перекрываемого зеркалом, при изменении углового положения пластинки. Отраженный пучок регистрировали при помощи ионизационной камеры, соединенной с электрометром. Вся установка помещалась на массивном фундаменте (барит). Постепенно увеличивая толщину слоя исследуемого вещества, фиксировали толщину, при которой влияние отражения от подложки прекращалось. Так определяли глубину проникновения в материал первичного пучка РЛ в процессе полного отражения. Физическую природу подложки можно было изменить, нанеся на стекло достаточно толстый слой нужного вещества. В результате создавали условия, при которых на границе двух сред коэффициент преломления был как меньше единицы, так и больше единицы. Исследовали отражение не только от прозрачных, но и от сильно поглощающих РЛ веществ. Авторы сравнивали результаты своих измерений с расчетными данными, полученными из разработанной ими теории. Теория явления полного отражения РЛ была ими создана на основании представлений классической оптики (Максвелл, Френель). Работа продолжалась несколько лет (1930–1933 гг.). Все полученные А. И. Алихановым и Л. А. Арцимовичем экспериментальные данные хорошо описывались разработанной ими теорией. Таким образом, выполненные А. И. Алихановым и Л. А. Арцимовичем исследования однозначно установили справедливость уравнений классической оптики при описании полного отражения жестких рентгеновых лучей. Результаты своих исследований в области оптики рентгеновых лучей А. И. Алиханов обобщил в упомянутой выше монографии [3].

В 1932 г. были сделаны два очень важных открытия: были обнаружены нейтроны и позитроны. А. Ф. Иоффе понял, что пришло время начать исследования в новом для ЛФТИ направлении — ядерной физике. Он создал отдел

ядерной физики, который вскоре возглавил И. В. Курчатов. В своем отделе — отделе физики твердого тела — А. Ф. Иоффе создал лабораторию позитронов, во главе которой встал А. И. Алиханов. Абрам Исаакович вновь изменил тематику своих исследований. Сообщение К. Андерсона об обнаружении в космических лучах положительных электронов, т. е. позитронов, было опубликовано в конце 1932 г. Это открытие очень быстро было подтверждено другими экспериментаторами. Сомнений не осталось. В 1936 г. К. Андерсон был удостоен Нобелевской премии. Началась «охота» за «земными» источниками позитронов. При этом все группы экспериментаторов использовали в своих работах камеры Вильсона. Этот прибор был очень популярен в двадцатых годах прошлого века, но сегодня уже основательно забыт.

Для того чтобы было понятно, почему А. И. Алиханов отказался от использования в своих исследованиях камеры Вильсона, напомним в двух словах ее устройство. Камера Вильсона — это стеклянный цилиндрический сосуд, одно из оснований которого служит в качестве поршня. Камера заполняется каким-либо газом, и внутрь наливают небольшое количество жидкости, обычно это вода или спирт. В камере образуется насыщенный пар этой жидкости. При резком движении поршня внутри камеры на короткий промежуток времени возникает пересыщенный пар. Если в течение этого промежутка времени через объем камеры проходит заряженная частица, то на создаваемых ею ионах происходит конденсация паров, т. е. образуются капельки жидкости, и трек становится визуально наблюдаемым. Его можно сфотографировать. Помещая камеру в однородное магнитное поле  $H$ , придают треку форму винтовой линии. Сечение винтовой линии плоскостью, нормальной к оси, представляет собой окружность, радиус которой  $\rho$  связан с импульсом частицы:

$$H\rho = \frac{m_0c^2\beta}{e\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (8)$$

Здесь  $m_0$  — масса частицы;  $\beta = v/c$  — отношение скорости частицы к скорости света;  $e$  — электрический заряд. Кривизна треков искажается вследствие наличия многократного рассеяния частиц в газе камеры. Электроны и позитроны с одинаковыми импульсами, но движущиеся в противоположных направлениях, создают одинаковые треки. Использование сильных радиоактивных источников приводит к образованию большого количества фоновых треков, а то и к образованию тумана в камере.

Отметим, что Д. В. Скобельцын в 1926 г. впервые использовал камеру Вильсона, помещенную в магнитное поле, для измерения энергии заряженных частиц. Он раньше К. Андерсона, еще в 1931 г., обнаружил в своей камере треки электронов с «неправильной» кривизной, но по указанной выше причине не решился утверждать, что видит новые частицы — положительно заряженные электроны.



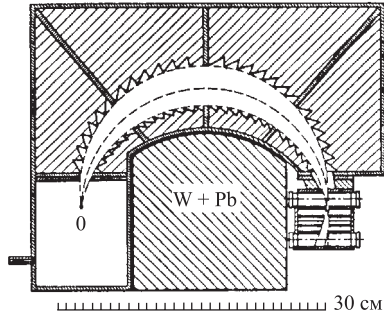


Рис. 4. Схема магнитного спектрометра Даныша. Магнитное поле нормально к плоскости рисунка

Решив начать исследования в новой для себя области — спектроскопии электронов и позитронов, — А. И. Алиханов сразу выбрал другую методику. Был создан магнитный спектрометр типа спектрометра Даныша. Спектрометр был изготовлен так, чтобы максимально снизить фон от рассеянных электронов и гамма-квантов. Впервые для регистрации излучения (электроны, позитроны) был использован телескоп, состоявший из двух счетчиков Гейгера–Мюллера, включенных в схему совпадений (см. рис. 4). Схема совпадений была собрана на электронных лампах-тетрадах с большим ко-

эффициентом усиления. Было положено начало ядерной электроники в СССР. На магнитном спектрометре были выполнены систематические исследования энергетических спектров электронов и позитронов, испускаемых как природными, так и искусственными радиоактивными источниками. Искусственная радиоактивность была открыта супругами Жолио-Кюри [5]. Они обнаружили, что при облучении некоторых ядер  $\alpha$ -лучами возникает позитронная активность. Уже тогда было ясно, что под воздействием  $\alpha$ -лучей происходят ядерные превращения. Потом поняли, что это были  $(\alpha, n)$ - и  $(\alpha, p)$ -ядерные реакции. В результате этих превращений образуются радиоактивные нуклиды. За открытие искусственной радиоактивности супруги Жолио-Кюри были удостоены Нобелевской премии. Независимо от супругов Жолио-Кюри то же самое открытие сделали А. И. Алиханов и А. И. Алиханьян. В отличие от супругов Жолио-Кюри они использовали в своей работе не камеру Вильсона, а упомянутый выше магнитный спектрометр. Они также имели дело с  $(\alpha, n)$ - и  $(\alpha, p)$ -реакциями, но свое сообщение об обнаружении «нового вида радиоактивности» послали в журнал «Nature» на несколько месяцев позже супругов Кюри [6]. Свои исследования на магнитном спектрометре А. И. Алиханов начал с изучения спектров позитронов, возникающих в процессе внешней парной конверсии (ПК) гамма-квантов. К началу работ А. И. Алиханова внешняя ПК была уже обнаружена. В работе [7] приведена оценка сечения этого процесса и даже высказано предположение о возможном существовании явления внутренней ПК. А. И. Алиханов со своими учениками впервые исследовал спектр позитронов внешней ПК во всем энергетическом диапазоне и показал, что, в согласии с теорией, максимум спектров соответствует энергии позитронов, равной половине максимальной. После публикации работы [7] появились сообщения о наблюдении внутренней ПК, однако без должных доказательств. Это явление было впервые надежно обнаружено

и описано в работах группы А. И. Алиханова. Историю этих исследований можно проследить, читая сборник избранных трудов А. И. Алиханова [8].

Позволим себе напомнить, что в вакууме фотон не может превратиться в электрон-позитронную пару, так как этому препятствует закон сохранения импульса. Фотон не может передать весь свой импульс электрону и позитрону, нужен третий партнер. Поскольку сечение процесса пропорционально квадрату заряда этого партнера, то в качестве конвертора гамма-квантов используют свинцовую фольгу. «Внешний» гамма-квант, исходящий из некоторого источника и обладающий энергией, превосходящей удвоенную

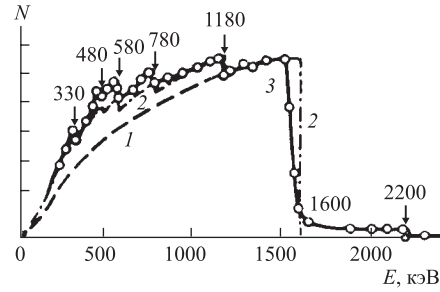


Рис. 5. Энергетический спектр позитронов радиоактивного источника RaC ( $^{214}\text{Bi}$ ). Цифрами обозначены энергии гамма-линий

энергию покоя электрона в кулоновском поле тяжелого ядра, может превратиться в  $e^+e^-$ -пару. Процесс внутренней ПК заключается в том, что энергия возбуждения ядра ( $E > 2m_0c^2$ ) снимается не путем испускания реального гамма-кванта, а путем испускания виртуального фотона, который превращается в  $e^+e^-$ -пару, исходящую из ядра. Энергетический спектр позитронов внутренней ПК существенно отличается от спектра позитронов внешней ПК. Максимальная энергия позитронов внутренней ПК равна, очевидно,  $E_{\text{max}} = E - 1,02 \text{ МэВ}$ . Здесь  $E$  — энергия перехода;  $1,02 \text{ МэВ} = 2m_0c^2$  — та энергия, которую нужно затратить на рождение пары. В конце спектра возникает резкий обрыв, как это видно на рис. 5, на котором показан спектр позитронов RaC ( $^{214}\text{Bi}$ ). Кривая 1 на этом рисунке рассчитана с учетом только одной, ранее известной гамма-линии с энергией около 1600 кэВ. Кривая 2 рассчитана с учетом всех обнаруженных переходов, кривая 3 — экспериментальная. Кривые 2 и 3 практически совпадают. Отметим (см. сборник статей [8]), что А. И. Алиханов и его коллеги не сразу поняли, что в их руках оказался новый мощный инструмент ядерной спектроскопии. Лишь увеличив разрешающую способность спектрометра, они обнаружили, что «лишние» позитроны объясняются наличием ранее неизвестных гамма-линий. Исследуя спектры позитронов, авторы воссоздали схемы распадов различных ядер. Работы группы А. И. Алиханова положили начало современной ядерной спектроскопии. В цикле своих работ по исследованию внутренней ПК [8] А. И. Алиханов впервые измерил коэффициенты внутренней конверсии  $\alpha_{\text{конв}} = N_{\text{пар}}/N_{\gamma}$  — отношение числа  $e^+e^-$ -пар к числу гамма-квантов данного перехода. Поскольку  $\alpha_{\text{пар}} \sim 10^{-4}$  и данный переход нужно выделить на фоне всех остальных, это были очень непростые изме-

рения. В период 1934–1940 гг. группа А. И. Алиханова стала мировым лидером в области позитронной спектроскопии. К сказанному следует добавить, что А. И. Алиханов и его коллеги исследовали также углы разлета электронов и позитронов. В специальном эксперименте тщательно измерили угловое распределение гамма-квантов аннигиляции  $e^+e^-$  — позитронов и электронов — и для мягких позитронов показали, что два гамма-кванта разлетаются под углом  $180^\circ$  в соответствии с законом сохранения энергии-импульса. Тем самым был подведен итог многолетней дискуссии о возможном нарушении законов сохранения в микромире, инициированной в 20-х гг. прошлого века Н. Бором. Впервые было обнаружено влияние кулоновского поля ядра на форму бета-спектра (как  $e^-$ , так и  $e^+$ ) в мягкой части спектра. Кроме того, исследовали форму бета-спектра вблизи максимальной энергии электронов, где интенсивность близка к нулю. Целью этих исследований была попытка измерить массу нейтрино. Однако тогда время для подобных измерений еще не пришло, и объект исследований был выбран не лучшим образом: RaE обладает аномальной формой спектра (к этому бета-активному источнику мы еще вернемся).

Наконец, отметим, что А. И. Алихановым были выполнены исследования рассеяния и поглощения релятивистских электронов. Была доказана справедливость предсказаний релятивистской квантовой теории. (Более подробно о периоде работы А. И. Алиханова в ЛФТИ см. в [9].) Работы, выполненные А. И. Алихановым в указанный период, находились на самом высоком, «нобелевском» уровне. Неудивительно, что в 1935 г. А. И. Алиханову была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук, в 1939 г. он был избран в члены-корреспонденты АН СССР, а в 1943 г. стал ее действительным членом (академиком).

В 1942–1943 гг. А. И. Алиханов начал интересоваться физикой космических лучей. Эти исследования впоследствии, когда появились ускорители, естественным образом привели Абрама Исааковича в физику элементарных частиц. Проанализировав мировые данные о составе космических лучей, Абрам Исаакович пришел к выводу о том, что в космических лучах, кроме двух известных компонентов (мягкий — фотоны, электроны; жесткий — мюоны), должен присутствовать третий компонент — протоны. Предсказание было подтверждено его собственными работами в горах Армении, а также, независимо, группой ФИАН в горах Памира.

К сожалению, здесь не обошлось без досадной ошибки. Исследуя спектр космических лучей, А. И. Алиханов и А. И. Алиханьян, вследствие методической погрешности, пришли к выводу о существовании так называемых «варитронов». Этот вывод оказался неверным. Спрашивается, почему об этой ошибке физики (в нашей стране) до сих пор не забывают? Разве А. Эйнштейн не ошибался? Ф. Райнес очень грубо ошибался, «обнаружив» нейтринные осцилляции, но, несмотря на эту ошибку, в 1995 г. он был удостоен Нобе-

левской премии. Ученый имеет право на ошибку, в противном случае он лишается права на свободное творчество, лишается права заниматься наукой.

В 1943 г. в СССР развернулись работы по созданию атомного оружия. А. И. Алиханов был привлечен к решению этой проблемы с самого начала. Возглавил проект соратник А. И. Алиханова по ЛФТИ И. В. Курчатов.

В 1943 г. И. В. Курчатов основал научный центр, ныне носящий его имя, тогда — Лабораторию №2 АН СССР. В этом центре разрабатывали атомные реакторы, в которых в качестве замедлителя нейтронов использовали графит. А. И. Алиханов создал научный центр, тогда — Лабораторию №3 АН СССР, ныне это Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), в котором разрабатывали тяжеловодные реакторы. Абрам Исаакович Алиханов до конца своих дней оставался горячим сторонником и признанным главою тяжеловодного направления в реакторостроении. Но предпочтение было отдано более дешевым «графитовым» реакторам. В Канаде сделали выбор в пользу тяжеловодных реакторов. Вся атомная энергетика Канады основана на использовании тяжеловодных реакторов, которые зарекомендовали себя с самой лучшей стороны. Возникает естественный вопрос, если бы и в СССР был сделан такой выбор, чернобыльской катастрофы можно было избежать? Тяжеловодные реакторы обладают высокой надежностью, о чем сейчас будет сказано. Но, нарушая правила эксплуатации, можно вызвать аварию на любом реакторе. Нельзя доверять эксплуатацию реакторов недостаточно грамотному или, тем более, безответственному персоналу.

Лаборатория №3 была создана по постановлению Совета министров СССР 1 декабря 1945 г. Лаборатории вменялись в обязанность разработка тяжеловодных реакторов и развитие исследований в области ядерной физики. Директором лаборатории был назначен академик А. И. Алиханов. Директору был 41 год, он был полон сил, обладал незаурядным здоровьем. Полный энтузиазма, Абрам Исаакович окружил себя молодыми талантливыми сотрудниками. Заместителем директора по научной части был назначен В. В. Владимирский. Группу теоретиков возглавил И. Я. Померанчук. Сотрудником лаборатории по совместительству являлся и ближайший друг Абрама Исааковича Лев Давидович Ландау. Коллектив лаборатории был очень небольшим, но это были одаренные люди, как физики, так и инженеры. Теория тепловых атомных реакторов была создана трудами Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчука и И. И. Гуревича. В ее развитии (тяжеловодные реакторы) огромная роль принадлежит А. Д. Галанину. Расчеты сопровождались экспериментальными исследованиями, в которых источниками нейтронов служили радиоактивные препараты (Ra+Be). Расчеты выполняла группа математиков, которую возглавлял А. С. Кронрод. Все сделали сами, никаких сведений «со стороны» не поступало. Через год, в 1947 г., проект первого в стране тяжеловодного реактора был готов, в 1948 г. реактор был построен, а в апреле 1949 г. состоялся его физический пуск. Пуск реактора осуществили тайно, ночью, а когда



(твэлы) — урановые стержни. Активная зона заполнена тяжелой водой. Одним из преимуществ тяжеловодных реакторов является возможность использовать в качестве топлива необогащенный, т. е. естественный, уран. На верхней части аппарата — на «крышке» — видны устройства, предназначенные для подъема урановых стержней и извлечения их из зоны. Крышка могла поворачиваться. Это позволяло легко изменять конфигурацию стержней в АЗ, т. е. организовывать различные «решетки». Была выполнена серия экспериментов с целью определения критического уровня воды в зависимости от вида решетки. Результаты измерений сравнивали с расчетными данными. Был найден оптимальный вариант АЗ для промышленного аппарата. На реакторе были проведены и другие эксперименты, необходимые для выполнения расчетов промышленных реакторов. Работать приходилось «на износ». Особенно тяжело было директору, и это не могло не отразиться на его здоровье. Первый серьезный сердечный приступ «настиг» Абрама Исааковича на Урале, на площадке строительства промышленного варианта тяжеловодного реактора. Промышленные тяжеловодные реакторы вскоре вошли в строй. Затем были построены исследовательские тяжеловодные реакторы в Китае и Югославии.

Одним из самых главных преимуществ тяжеловодных реакторов является их высокая надежность, т. е. устойчивость в работе. С увеличением мощности в АЗ реактора возрастает температура. Повышение температуры вызывает отрицательную «обратную связь» — реактор стремится снизить мощность. Иными словами, тяжеловодные реакторы обладают значительным отрицательным температурным коэффициентом. В докладе, представленном А. И. Алихановым и его коллегами на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955 г.) [10], сказано: «Значительный отрицательный температурный коэффициент делает реактор вполне устойчивым в управлении. После прогрева и установления концентрации отравляющего ксенона-135 реактор может неограниченно долго работать в стационарном режиме при выключенных или полностью вынутых из аппарата регуляторах. Саморегулирование мощности за счет отрицательного температурного коэффициента исключает возможность аварии при порче регуляторов. Если вынуть все регуляторы на остановленном аппарате, мощность быстро возрастает... затем снижается и постепенно устанавливается около значения, определяемого теплосъемом». Этого замечательного свойства явно не хватало чернобыльскому аппарату. Тем не менее можно представить себе ситуацию, при которой и тяжеловодный реактор приобретает положительный температурный коэффициент. Если охлаждение тепловыделяющих элементов осуществляется водой, то прекращение подачи хладагента может привести к такой ситуации. Это связано с уменьшением поглощения нейтронов в АЗ. Даже тяжелая вода поглощает нейтроны, и ее отсутствие в системе охлаждения АЗ может привести к положительной обратной связи. Такое явление называют «пустотным эффектом». В ИТЭФ было найдено и опробовано на

практике «противоядие», которое практически исключает влияние «пустотного эффекта» на реактивность реактора. Был создан энергетический реактор с газовым охлаждением. В качестве хладагента был использован газ  $\text{CO}_2$  под давлением около 100 атм. Этот газ почти совсем не поглощает нейтроны, и «пустотный эффект» так незначительно влияет на реактивность реактора, что система управления легко справляется с этим эффектом. Реактор, о котором идет речь, был построен в Словакии. Это был реактор первой атомной электростанции в ЧССР, он проработал около пяти лет и был остановлен по причинам, не имеющим отношения к рассматриваемой проблеме. Можно сказать, что опыт эксплуатации этого реактора оправдал надежды, связанные с использованием газового охлаждения в АЗ реактора. Одним из главных недостатков тяжеловодных реакторов является дороговизна тяжелой воды. Но зато, чтобы не терять драгоценный продукт, эти реакторы строят очень тщательно, сводя к минимуму все возможные утечки  $\text{D}_2\text{O}$ .

Вскоре после пуска тяжеловодного реактора в ИТЭФ был введен в строй циклотрон. Ускоряли дейтроны. Пучок нейтронов получали за счет  $(d, n)$ -реакции. Интенсивность пучка дейтронов модулировали, что позволило применить метод времени пролета для измерения эффективных нейтронных сечений. Измерения нейтронных сечений для нужд реакторостроения были выполнены с высокой точностью.

С пуском тяжеловодных промышленных аппаратов завершилось выполнение задания Правительства.

В 1954 г. Абраму Исааковичу Алиханову было присвоено звание Героя Социалистического Труда. Правительственных наград были удостоены ведущие научные сотрудники ИТЭФ.

Поскольку тяжеловодным атомным реакторам не суждено было стать опорой атомной энергетики в СССР, в ИТЭФ сместили «центр тяжести» научных интересов в область ядерной физики и физики элементарных частиц. А. И. Алиханов и В. В. Владимирский решили начать проектирование и строительство протонных ускорителей с жесткой фокусировкой. Первый в стране такой ускоритель на энергию протонов 7 ГэВ был введен в эксплуатацию на территории ИТЭФ в 1961 г. Второй — на энергию 70 ГэВ, самый крупный ускоритель протонов в мире в то время — начали строить одновременно под г. Серпуховом (Протвино). Все надежды дальнейшего развития ИТЭФ у А. И. Алиханова были связаны именно с этим ускорителем. К сожалению, радужным надеждам не суждено было сбыться.

До начала работ на ускорителе, в период 1957–1960 гг., в ИТЭФ под руководством А. И. Алиханова была выполнена большая серия работ, посвященных исследованиям нарушения закона сохранения пространственной четности в бета-распаде. В 1956 г. Ли и Янг (T. D. Lee, C. N. Yang) [11] высказали предположение о том, что слабое взаимодействие не инвариантно относительно инверсии координат, и предсказали ряд эффектов, которые нужно

было обнаружено экспериментально. В 1957 г. профессор Ву (C. S. Wu) и ее коллеги [12] обнаружили нарушение закона сохранения четности в бета-распаде. Оказалось, что электроны бета-распада ядра  $^{60}\text{Co}$  испускаются главным образом в направлении, противоположном направлению поляризации этих ядер. Была обнаружена  $P$ -нечетная угловая корреляция  $\sigma\mathbf{p}$  ( $\sigma$  — вектор спина ядер,  $\mathbf{p}$  — импульс электронов), которая изменяет знак при инверсии координат.

После этого открытия теоретическое описание бета-распада стало более сложным: удвоилось количество констант взаимодействий, которые могли, в принципе, давать вклад в этот процесс. Если бы эти константы оказались комплексными, то их количество могло бы еще удвоиться и достигнуть 16. Целью работ, выполненных в ИТЭФ, было не только подтверждение наличия эффекта путем постановки других экспериментов, но и раскрытие структуры слабого взаимодействия. А. И. Алиханов сам участвовал в серии измерений продольной поляризации электронов как для разрешенных переходов, так и для переходов первого запрещения (уникальных и кулоновских). Наличие продольной поляризации электронов, испускаемых неполяризованными ядрами, является очевидным доказательством несохранения пространственной четности, так как корреляция  $\sigma_e\mathbf{p}_e$  ( $\sigma_e$  — спин электрона,  $\mathbf{p}_e$  — импульс электрона) изменяет знак при инверсии координат. Среди четырех групп экспериментаторов, которые первыми и почти одновременно обнаружили продольную поляризацию электронов бета-распада, две были из ИТЭФ. Это группы А. И. Алиханова [13] и С. Я. Никитина [14]. Исходя из сказанного выше в этой статье можно утверждать, что возвращение к исследованиям бета-распада для Абрама Исааковича было чем-то вроде возвращения в «родную стихию». Для измерения величины продольной поляризации электронов он использовал метод моттовского рассеяния. Продольную поляризацию электронов нужно было трансформировать в поперечную и измерять величину азимутальной асимметрии при однократном рассеянии на большой угол от рассеивателя с большим атомным номером. Для трансформации продольной поляризации в поперечную использовали отклонение траектории пучка электронов на угол, близкий к  $90^\circ$  в кулоновском поле ядер при многократном рассеянии в толстой мишени. Этот метод можно использовать в широком диапазоне энергий электронов, тогда как метод отклонения пучка во внешних полях годится только в случае достаточно мягких электронов. Схема установки для исследования моттовского рассеяния электронов показана на рис. 7. В случае разрешенных переходов (орбитальный момент отсутствует) поляризация электронов, согласно теории, должна равняться  $-v/c$  — отношению величин скоростей электрона и света. Отрицательный знак означает, что спин электрона должен быть направлен в сторону, противоположную импульсу (отрицательная спиральность). Для позитронов (т. е. античастиц) спиральность, наоборот, должна быть положительной. А. И. Алиханов и его



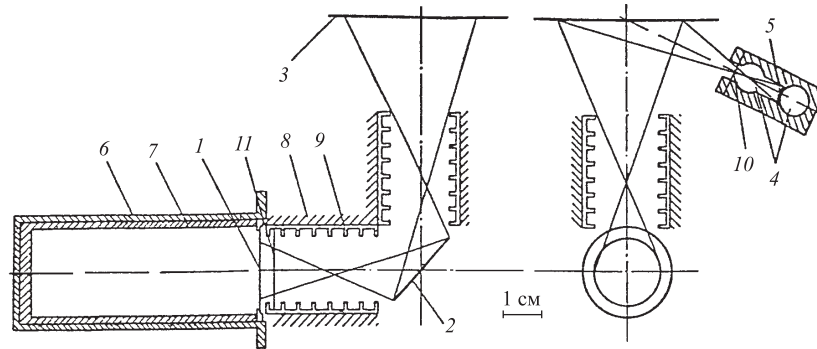


Рис. 7. Схема прибора для исследования моттовского рассеяния электронов: 1 — источник электронов; 2 — рассеиватель-трансформатор; 3 — рассеиватель-анализатор (золотая фольга); 4 — счетчики Гейгера-Мюллера; 5 — алюминиевый фильтр между счетчиками; 6 — латунный стаканчик; 7 — плексигласовый стаканчик; 8 — корпус прибора; 9 — диафрагма; 10 — полиэтиленовая пленка; 11 — тонкая коллодиевая пленка

коллеги показали, что и в случае гамов-теллеровских переходов первого запрещения, так называемых кулоновских ( $\Delta I \neq 2$ ) и уникальных ( $\Delta I = 2$ ), продольная поляризация электронов также равна  $-v/c$  [15].

Ранее нами было отмечено, что RaE обладает аномальной формой бета-спектра. Этот распад является первым запрещенным  $1^- \rightarrow 0^+$  кулоновским переходом и должен, как и разрешенные переходы, обладать фермиевским спектром. Аномальную форму бета-спектра RaE удалось объяснить (см., например, [16]) с учетом специфики электронных волновых функций в поле этого ядра. На вероятность бета-распада RaE может оказывать влияние компенсация основных матричных элементов, вследствие чего начинают играть роль обычно подавленные члены более высоких порядков, сильно зависящие от энергии. В результате удалось теоретически объяснить наблюдаемую форму спектра RaE. А. И. Алиханов предположил, что в случае RaE величина продольной поляризации электронов может отличаться от значения  $v/c$ , что и было им обнаружено экспериментально [17]. Продольная поляризация электронов бета-распада RaE, исследованная А. И. Алихановым, получила обоснование в работе теоретиков ИТЭФ [18]. Однако самым ценным и интересным свойством спектра RaE оказалась его чувствительность к нарушению временной инвариантности. При этом в случае нарушения временной инвариантности продольная поляризация электронов должна зависеть от их энергии [18]. Энергетическая зависимость поляризации электронов RaE не была обнаружена. Величина поляризации оказалась равной  $(-0,73 \pm 0,04) v/c$  (коэффициент не зависит от энергии). Сравнение экспериментальных и теоретических

данных позволило сделать вывод о сохранении временной инвариантности в бета-распаде и установить структуру слабого взаимодействия. Согласно полученным данным это хорошо теперь известная (V–A)-структура. Разность фаз векторного (V) и аксиально-векторного (A) матричных элементов оказалась близкой к  $180^\circ$  — в пределах погрешности  $\Delta\theta \sim 4^\circ$ . Эта точность оставалась непревзойденной в течение многих лет. Вся история открытия несохранения четности в бета-распаде и развития исследований в этой области за период 1957–1960 гг. изложена А. И. Алихановым в его монографии [19].

После пуска ускорителя протонов в 1961 г. физика элементарных частиц стала основной тематикой исследований в ИТЭФ. Под руководством А. И. Алиханова была составлена программа работ на этом ускорителе. Будущее развитие ИТЭФ Абрам Исаакович связывал с большим ускорителем, строительство которого продолжалось под Серпуховом. Однако эти планы не осуществились. Руководство ведомства отобрало у ИТЭФ еще не достроенный ускоритель. На базе этого ускорителя был создан другой институт. В условиях, когда физика элементарных частиц стала ведущим направлением исследований в ИТЭФ, это решение А. И. Алиханов воспринял как «катастрофу», которая перечеркивала все его планы. Судьба Абрама Исааковича была не из легких. Но даже когда его жизни угрожала опасность, он так не переживал, как на этот раз. Произошел тяжелый инсульт, от которого директор ИТЭФ уже не смог полностью оправиться. Если раньше директор управлял институтом «железной рукой», то теперь он этого делать не мог. Появились люди, которые решили использовать это обстоятельство в своих целях.

В 1968 г. А. И. Алиханов подал в отставку. В 1970 г. его не стало. Ушел из жизни крупный ученый, мужественный человек, великолепный организатор. Недавно Институту теоретической и экспериментальной физики присвоено имя его создателя. ИТЭФ — это памятник, который А. И. Алиханов сам себе поставил.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Darwin C. G.* // *Phyl. Mag.* 1914. V. 27. P. 325; 675; 1922. V. 43. P. 800.
2. *Ewald P. P.* // *Ann. Phys.* 1917. V. 54. P. 519; 577; *Z. Phys.* 1920. V. 2. P. 232; 1924. V. 30. P. 1; 1925. V. 26. P. 29.
3. *Алиханов А. И.* Оптика рентгеновых лучей. Л.: Гостехиздат, 1933.
4. *Alichanov A. I., Artsimovich L. A.* // *Z. Phys.* 1931. V. 60. P. 69; 853; 1933. V. 82. P. 489; *Алиханов А. И., Арцимович Л. А.* // *ЖЭТФ.* 1933. Т. 3. С. 115.
5. *Curie I., Joliot F.* // *J. Phys.* 1934. V. 198. P. 502.
6. *Alichanov A. I., Alichanian A. I., Dzelepov B. S.* // *Nature.* 1934. V. 133. P. 871.
7. *Oppenheimer J. R., Plesset M. S.* // *Phys. Rev.* 1933. V. 44. P. 53.
8. *Алиханов А. И.* Избр. тр. М.: Наука, 1975.

9. *Гаспарян В.Г., Гринберг А.П., Френкель В.Я.* // А.И.Алиханов. Воспоминания, письма, документы: Сб. Л.; М., 1989.
10. *Алиханов А.И. и др.* // Материалы Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. Т.2: Физика: экспериментальные реакторы. С.331; см. также [8, с. 269].
11. *Lee T.D., Yang C.N.* // Phys. Rev. 1956. V.104. P.254.
12. *Wu C.S. et al.* // Phys. Rev. 1957. V.105. P.1413.
13. *Алиханов А.И. и др.* // ЖЭТФ. 1957. Т.32. С.1344; 1958. Т.34. С.78.
14. *Вишневский М.Е. и др.* // Nucl. Phys. 1957. V.4. P.271.
15. *Алиханов А.И., Елисеев Г.П., Любимов В.А.* // ЖЭТФ. 1958. Т.34. С.1045.
16. *Yatada M.* // Prog. Theor. Phys. 1953. V.10. P.252.
17. *Алиханов А.И., Елисеев Г.П., Любимов В.А.* // ЖЭТФ. 1958. Т.35. С.1061; Nucl. Phys. 1959. V.13. P.541.
18. *Геишкенбейн Б.В., Немировская С.А., Рудик А.П.* // ЖЭТФ. 1959. Т.36. С.517.
19. *Алиханов А.И.* Слабые взаимодействия. Новейшие исследования  $\beta$ -распада. М.: Физматгиз, 1960.