

*Памяти Олега Игоревича Сумбаева (1930–2002) –
основателя Петербургской школы дифракционных
исследований*

КРИСТАЛЛ-ДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ФИЗИКЕ

В.В. Федоров



Федоров Валерий Васильевич – директор Отделения нейтронных исследований Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой нейтронной физики Академического физико-технологического университета РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, президент Российского нейтронографического общества.

В статье обсуждаются основные достижения и результаты, связанные с развитием кристалл-дифракционных методов и их применением в различных областях физики, которые были получены в Лаборатории рентгеновской и гамма-спектроскопии О.И. Сумбаева с момента создания в 1956 г. первого в стране фокусирующего кристалл-дифракционного спектрометра и до сегодняшних дней.

Введение

Создание в 1956 году первого в нашей стране фокусирующего кристалл-дифракционного γ -спектрометра по Кошуа (ГСК-1) О.И. Сумбаевым и П.И. Лукирским (1894–1954) [1] привело к образованию Гатчинской научной школы дифракционных исследований и применению дифракционных методов в чрезвычайно разнообразных областях физики (к сожалению, П.И. Лукирский не смог увидеть готовый прибор). Это событие не осталось незамеченным. 17 марта 1956 года ленинградская газета «Смена» опубликовала статью (рис. 1), посвященную молодому ученому Олегу Сумбаеву, который только что завершил работу по созданию спектрометра, начатую совместно с академиком П.И. Лукирским. В газете отмечалось, что теперь не только США, но и СССР будет владеть кристалл-дифракционным методом.

На этом спектрометре (установленном в 310 комнате 1-го корпуса рядом с реакторным залом) уже в 1961 году была выполнена работа по исследованию эффекта Моссбауэра на изотопах вольфрама [2] (О.И. Сумбаев, А.И. Смирнов, В.С. Зыков), источником при этом служил отрезок металлической проволоки из тантала, облученный тепловыми нейтронами в реакторе ВВР-М при потоке 3×10^{14} н/с·см². Это была одна из первых работ, проведенных на реакторе ВВР-М, запущенном в декабре 1959 года. До сих пор спектрометр ГСК-1 успешно используется для проведения измерений малых энергетических смещений рентгеновских линий.

В настоящее время научная школа имеет богатый опыт создания уникальных кристалл-дифракционных приборов и работы на них. Существенный вклад был внесен в развитие физики дифракции рентгеновских лучей, электронов и нейтронов в совершенных кристаллах. Ряд обнаруженных новых эффектов нашел широкое применение в различных областях: от физики и химии твердого тела до физики ядра и элементарных частиц.



Рис. 1. Молодой Олег Сумбаев на странице газеты «Смена» в статье под заголовком «Непроторенной дорогой»

Развитая теория упругой квазимозаичности кристаллов (рис. 2) и теория дифракции в упругодеформированных кристаллах, разработанные О.И. Сумбаевым в 1957 году [3–7], дали уникальную возможность регулировать в пределах нескольких порядков светосилу и разрешение этих приборов (путем выбора соответст-

вующих кристаллографических плоскостей, толщин кристалла, радиусов изгиба и ориентаций их выреза) и получили мировое признание. Это позволило создавать спектрометры с оптимальными для конкретной работы параметрами.

Рентгеновские и гамма-спектрометры высокого разрешения нашли широкое применение в ядерной спектроскопии и спектроскопии экзотических атомов. Рентгеновские спектрометры с высокой светосилой используются в спектроскопии малых энергетических сдвигов (химических, изотопических и сверхтонких). Абсолютная точность в измерении малых смещений рентгеновских линий достигает 1 мэВ, что соответствует относительной точности 10^{-7} .

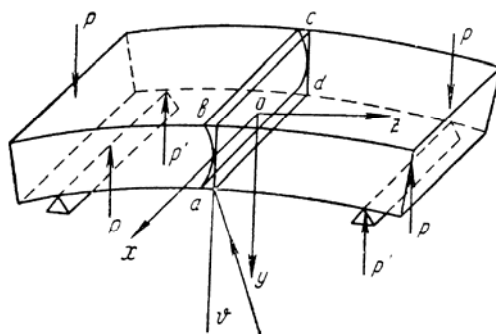


Рис. 2. Изгиб пластины кристалла приводит к изгибу кристаллографических плоскостей (квазимозаичность), перпендикулярных входной и выходной поверхностям пластины, что можно использовать в фокусирующих кристалл-дифракционных спектрометрах. Степень такого изгиба зависит от выбора соответствующих кристаллографических плоскостей, толщины пластины, радиуса изгиба кристалла, а также ориентации выреза пластины. В частности, поворот образца вокруг оси Z для выреза пластины может привести к существенному изменению радиуса изгиба плоскостей и, таким образом, к существенному изменению разрешения и светосилы прибора. Для некоторых систем плоскостей изгиб тождественно равен нулю. Соответствующим образом срезанные пластины используются для спектрометров с рекордно высоким разрешением

Рентгеновские (рис. 3) и гамма-спектрометры с оптимизированными разрешением и светосилой используются в настоящее время в атомной и молекулярной физике для исследования электронной структуры химической связи, изоморфных фазовых переходов в кристаллах, особенностей строения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и т. д. Они также используются в ядерной спектроскопии рекордно высокого разрешения (пример измеренной γ -линии приведен на рис. 4); для определения зарядовых радиусов и мультипольных моментов ядер путем измерения изотопических сдвигов и сверхтонких смещений рентгеновских линий, сопровождающих внутреннюю конверсию; для точного определения масс $\pi^{(-)}$, $K^{(-)}$ -мезонов и $\Sigma^{(-)}$ -гиперона, а также для изучения сильных адрон-ядерных взаимодействий в адронных атомах путем измерения рентгеновских спектров экзотических атомов.

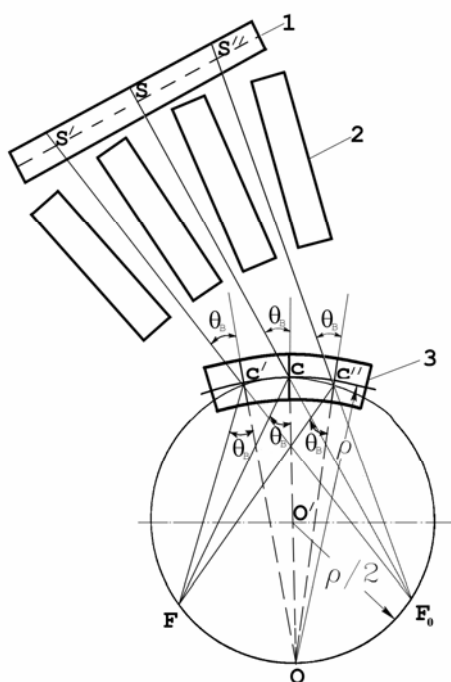


Рис. 3. Схема геометрии кристалл-дифракционного фокусирующего гамма-спектрометра по Кошуа: 1 – крупный радиационный источник, 2 – многощелевой сходящийся коллиматор, 3 – изогнутый кристалл. Дифрагированный пучок фокусируется в точке F на фокальном круге

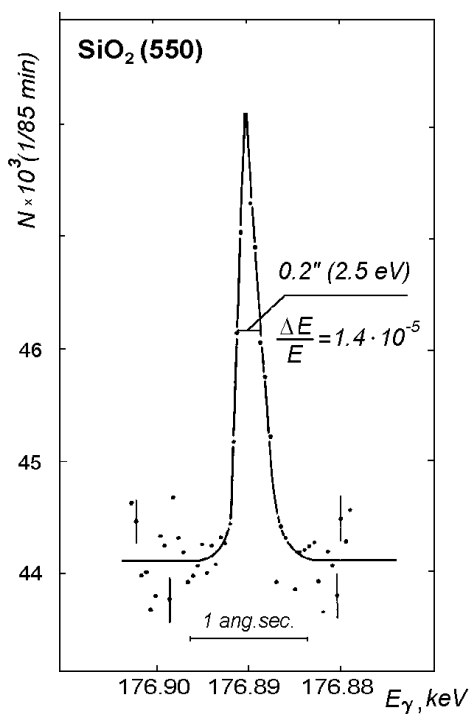


Рис. 4. Приборная форма γ -линии 176,89 кэВ, измеренной в 5-м порядке отражения с рекордным разрешением на ГСК-2м

Схема фокусирующего кристалл-дифракционного спектрометра по Кошуа представлена на рис. 5. Флуоресцентное рентгеновское излучение одного из источников S1–S4, возбуждаемое первичным излучением с непрерывным спектром рентгеновской трубки (или радиоактивного источника), через коллиматор (К) попадает на монокристаллическую кварцевую пластину, изогнутую по радиусу 2 м. Дифрагированные рентгеновские кванты фокусируются в узкую линию на расстоянии 2 м от кристалла и через приемную щель шириной 0,3 мм попадают на сцинтилляционный детектор NaJ(Tl).

Энергия, на которую настроен прибор, определяется положением приемной щели детектора и ориентацией отражающих плоскостей кристалла. Кристалл, зажатый между выпуклым и вогнутым зеркалами, крепится на столике, имеющем вертикальную ось. Ось скреплена с метровым рычагом, конец которого через сапфировую пластину и стальной закаленный шарик упирается в микрометрический винт, приводимый во вращение электродвигателем через червячный редуктор так, что одному обороту вращения мотора отвечает перемещение микрометрического винта на 5 мкм и, соответственно, поворот кристалла на 1 угловую секунду. Поворачивая кристалл на заданный угол, можно исследовать любой участок рентгеновской линии, проходящей через щель.

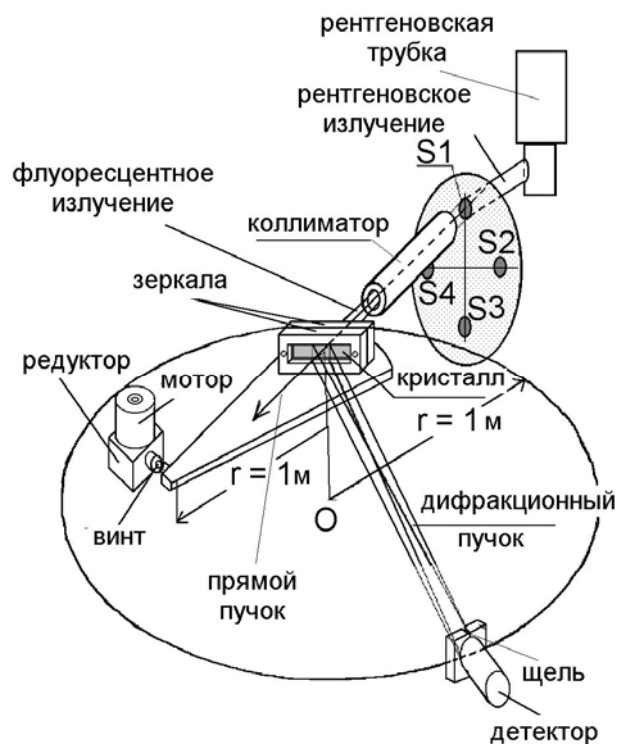


Рис. 5. Схема двухметрового кристалл-дифракционного спектрометра по Кошуа (ГСК-1) для измерения малых энергетических смещений рентгеновских линий

Проведены исследования по каналированию заряженных частиц в изогнутых монокристаллах. Было предсказано явление объемного захвата в режим каналирования частиц в изогнутом кристалле, подтвержденное экспериментально. Для регистрации и отбора каналированных частиц была создана уникальная установка, совмещающая в себе рабочий изогнутый кремниевый кристалл и несколько полупроводниковых детекторов на том же кристалле. Используя эффект объемного захвата и эту установку, удалось провести эксперимент по определению магнитного момента Σ^+ -гиперона, измеряя угол поворота его спина при каналировании в изогнутом монокристалле. Кроме того, теоретически и экспериментально показана новая возможность фокусировки каналирующих частиц высоких энергий изогнутым монокристаллом со специальным торцевым срезом. Это явление открывает новые возможности в управлении пучками частиц высоких энергий, и поэтому его исследования вызвали широкий интерес на ускорителях мирового значения.

С 1986 года в нашей лаборатории развивается новое направление научной деятельности. Мы начали исследования эффектов в динамической дифракции нейтронов в плоских и изогнутых совершенных монокристаллах. Для проведения такого рода экспериментов была разработана методика измерения дифракционной маятниковой картины. Эксперименты проводились в Гатчине на 2-м канале реактора ВВР-М. В частности, при дифракции нейтронов в слегка изогнутом кристалле по изменению контраста маятниковой картины при повороте экспериментальной установки впервые был измерен гравитационный эффект на одном кристалле.

Теоретически было предсказано наличие сильного внутрикристаллического электрического поля, действующего на нейтрон при дифракции в нецентросимметричном кристалле. Это ранее неизвестное явление было обнаружено и впервые измерено в эксперименте на реакторе ВВР-М по изменению фазы маятниковой картины при перевороте спина нейтрона при динамической дифракции поляризованных нейтронов в нецентросимметричном кристалле альфа-кварца. Полученная экспериментальная величина совпала с рассчитанной.

В настоящее время на реакторе ВВР-М продолжают эксперименты по дифракции нейтронов и нейтронной оптике в кристаллах при условиях, близких к брэгговским. В этих экспериментах обнаружен еще ряд новых интересных эффектов, таких как деполяризация нейтронов в прозрачном немагнитном кристалле без центра симметрии, существенное замедление нейтрона при дифракции в кристалле при углах, близких к прямому, и др. Некоторые из них нашли практическое применение, например для исследования объемного совершенства кристаллов на рекордно высоком уровне. Другие дают возможность существенно улучшить точность измерения фундаментальных характеристик нейтрона. Например, предложен и детально разработан новый метод поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона при дифракции в нецентросимметричном кристалле на уровне точности $\sim 10^{-26}$ е·см. Экспериментально показана возможность измерить электрический заряд нейтрона по крайней мере на порядок точнее предыдущего результата. Также появилась новая возможность исследовать гравитационное взаимодействие нейтрона с рекордной точностью в дифракционных экспериментах при углах Брэгга, близких к прямым углам.

Основные направления научной деятельности

1. Гамма-спектроскопия высокого разрешения.
2. Исследования электронной структуры редкоземельных элементов и актиноидов в химических соединениях, кристаллах и ВТСП-материалах методом измерения химических смещений рентгеновских линий.
3. Исследование зарядовых радиусов ядер по изотопическим смещениям рентгеновских линий, измерение мультипольных моментов ядер по сверхтонким смещениям рентгеновских линий, возбуждаемых при внутренней конверсии.
4. Определение адронных масс и исследование адронного ядерного взаимодействия путем точных измерений спектров адронных атомов.
5. Исследование каналирования элементарных частиц в изогнутых монокристаллах.
6. Исследование фундаментальных характеристик нейтрона при динамической дифракции в нецентросимметричных кристаллах.
7. Особенности нейтронной оптики и дифракции в нецентросимметричных кристаллах.

Первоначально все исследования проводились в секторе гамма-спектроскопии под руководством О.И. Сумбаева. Позднее сектор разделился и дал начало нескольким новым научным лабораториям и группам со своими собственными темами и направлениями исследований как в Отделении нейтронных исследований, так и Отделении физики высоких энергий (ОФВЭ) ПИЯФ РАН. В настоящее время это следующие подразделения:

1. Лаборатория рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий Федоров В.В., ОНИ).
2. Лаборатория химии и спектроскопии материалов (заведующий Грушко Ю.С., с 2009 г. Лебедев В.Т., ОНИ).
3. Лаборатория релятивистской ядерной физики (заведующий Самсонов В.М., ОФВЭ).
4. Лаборатория мезонных атомов (заведующий Иванов Ю.М., ОФВЭ).
5. Лаборатория АТЛАС (заведующий Федин О.Л., ОФВЭ).

Руководители основных научных направлений

Сумбаев Олег Игоревич (1930–2002) – основатель научной школы, работал в Петербургском институте ядерной физики РАН (до 1971 г. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН) с 1958 по 2002 г., окончил физико-механический факультет Ленинградского политехнического института (в настоящее время Санкт-Петербургский государственный технический университет), с 1966 г. – доктор физ.-мат. наук, с 1979 г. – член-корреспондент РАН, первый директор ПИЯФ с его основания в 1971 г. по 1986 г., заведующий Лабораторией рентгеновской и гамма-спектроскопии (ОНИ) до 2000 г., главный научный сотрудник до 2002 г.

Федоров Валерий Васильевич работает в ПИЯФ (филиал ФТИ до 1971 г.) с 1971 г. после окончания физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, с 1995 г. доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий Лабораторией рентгеновской и гамма-спектроскопии с 2000 г., директор ОНИ.

Грушко Юлий Сергеевич работает в ПИЯФ с 1961 г. после окончания химического факультета Санкт-Петербургского государственного университета и аспирантуры, с 1970 г. кандидат химических наук, до 2009 г. заведующий Лабораторией химии и спектроскопии материалов (в 2009 г. преобразована в Лабораторию нейтронных физико-химических исследований).

Лебедев Василий Тимофеевич работает в ПИЯФ с 1978 г., доктор физ.-мат. наук, заведующий Лабораторией нейтронных физико-химических исследований с 2009 г.

Воронин Владимир Владимирович работает в ПИЯФ с 1988 г. после окончания физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, доктор физ.-мат. наук, ученый секретарь ОНИ, руководитель группы в Лаборатории рентгеновской и гамма-спектроскопии.

Самсонов Владимир Михайлович работает в ПИЯФ с 1973 г. после окончания физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета и военной службы, с 1986 г. доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий Лабораторией релятивистской ядерной физики (ОФВЭ), директор ПИЯФ.

Смирнов Алексей Иванович (1937–1996) работал в ПИЯФ с 1961 по 1996 г., окончил физико-механический факультет Ленинградского политехнического института, кандидат физ.-мат. наук, с 1969 г. – сначала заведующий Лабораторией ядерной спектроскопии (ОНИ), затем заведующий Лабораторией мезонных атомов (ОФВЭ).

Федин Олег Львович работает в ПИЯФ с 1982 г. после окончания физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, кандидат физ.-мат. наук, заведующий Лабораторией АТЛАС (ОФВЭ).

Основная научная деятельность

1. Рентгеновская и гамма-дифракция в упругодеформированных кристаллах. Прецизионная спектроскопия

Одним из наиболее важных результатов деятельности научной школы явилось создание теории упругой квазимозаичности и теории дифракции в упругодеформированных кристаллах. Было установлено, что соответствующий выбор системы отражающих плоскостей кристаллов и выбор ориентации входной и выходной поверхностей кристаллов позволяют изменять в пределах нескольких порядков разрешение и светосилу (рис. 4, 6) кристалл-дифракционных приборов [3–9]. Глубокое понимание явлений дифракции рентгеновских и гамма-лучей в упругодеформированных монокристаллах с квазимозаичной структурой позволило создать ряд уникальных спектрометров, обладающих как высоким разрешением, так и светосилой.

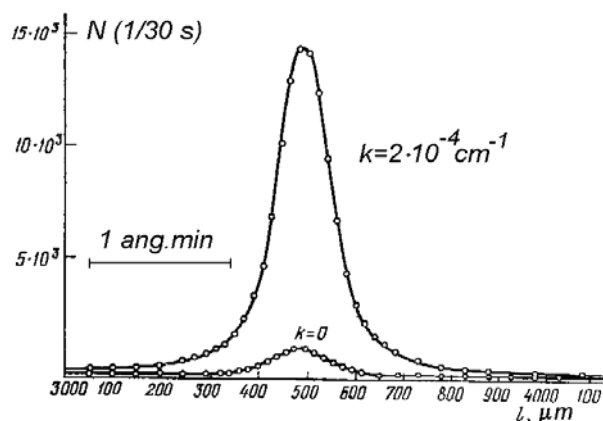


Рис. 6. Рентгеновские линии $K_{\alpha 1}$ Sn получены на двухметровом фокусирующем γ -спектрометре по Кошуа с использованием кварцевых пластин с одинаковыми отражающими плоскостями (130), но с разной ориентацией среза относительно оси, перпендикулярной этим плоскостям ($k = 0$ и $k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$). Величина k характеризует искривление отражающих плоскостей, вызванное изгибом пластины. Она в значительной степени зависит от ориентации среза пластины. Случай $k = 0$ соответствует неизогнутым плоскостям в изогнутой пластине кристалла, что используется для получения рекордного разрешения. Ось абсцисс (l) показывает смещение метрового слоя пропорционально углу вращения кристалла

В 1961 году О.И. Сумбаев и А.И. Смирнов сконструировали и построили новый кристалл-дифракционный фокусирующий гамма-спектрометр (ГСК-2) с четырехметровым фокусным расстоянием (рис. 7) для исследования γ -спектров в диапазоне энергий 40–1600 кэВ [10, 11]. Он был установлен на горизонтальном канале реактора ВВР-М практически сразу же после пуска реактора для изучения гамма-спектров в (n, γ)-реакциях. Это единственный прибор, который столько времени успешно проработал на реакторе и работает сейчас, более того, после нескольких модернизаций, проведенных В.Л. Алексеевым и В.Л. Румянцевым (одна из них – изготовление кристалла, где использовались рекомендации, полученные в работах О.И. Сумбаева, А.В. Тюниса, А.С. Рыльникова и В.М. Самсонова по выбору рабочих кристаллографических плоскостей кристалла и ориентации его вырезки), он имеет рекордное разрешение и не имеет себе равных в мире среди фокусирующих спектрометров.

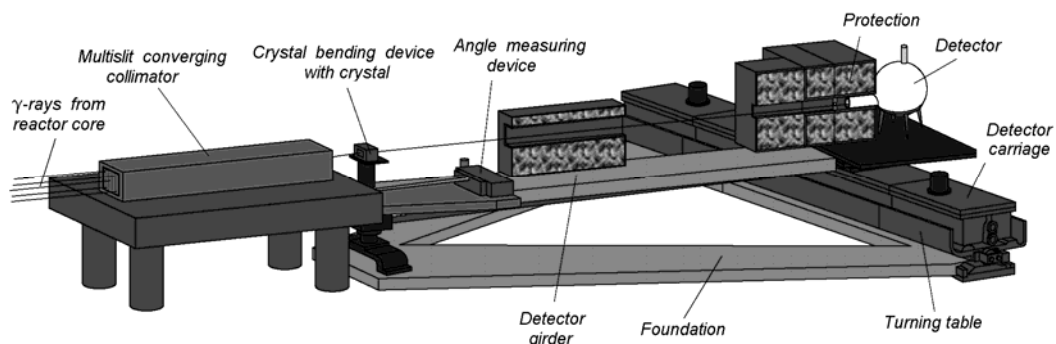


Рис. 7. Общий вид γ -спектрометра ГСК-2М

В 1996–1997 гг. была проведена новая модернизация прибора (В.Л. Алексеев, В.Л. Румянцев и др. [12–14], совместно с Лабораторией голографических информационных и измерительных систем ПИЯФ (зав. лаб. Б.Г. Турухано), которая является одной из ведущих среди мировых лидеров в создании интерферометрических голографических решеток). Впервые в мире спектрометр оснащен интерферометром на высокочастотных голографических решетках [14] с целью повышения точности относительных измерений углов дифракции (энергий) γ -лучей. Чрезвычайно малая длина оптического пути, равная 0,1 мм (на четыре порядка величины меньше, чем в обычно применяемых схемах интерферометра Майкельсона), в сочетании с широкополосностью системы обработки сигналов (0–400 кГц) позволили на реакторе ВВР-М достичь чувствительности $\sim 0,01''$, несмотря на то, что экспериментальный зал находится на уровне 2-го этажа и виброзащита пола и установки отсутствует. На спектрометре получено угловое разрешение $0,34''$ для полной апертуры ($40 \times 30 \text{ мм}^2$) и $0,2''$ для центральной части апертуры кристалла ($11 \times 5 \text{ мм}^2$) в диапазоне энергий 95–250 кэВ. Это разрешение является рекордным для фокусирующих γ -спектрометров. Теперь этот спектрометр позволяет проводить исследования энергий γ -лучей с точностью до нескольких десятых эВ.

Уже в одной из первых работ на нем были получены результаты (О.И. Сумбаев, В.Л. Алексеев, Д.М. Каминкер, А.И. Смирнов, В.А. Шабуров [15, 16], см. фотографии ниже), которые до сих пор остаются загадкой и требуют своего объяснения. Это – работа по изучению γ -спектра ^{104}Rh , в котором впервые была обнаружена нестатистичность в распределениях γ -линий по энергиям (см. рис. 8).

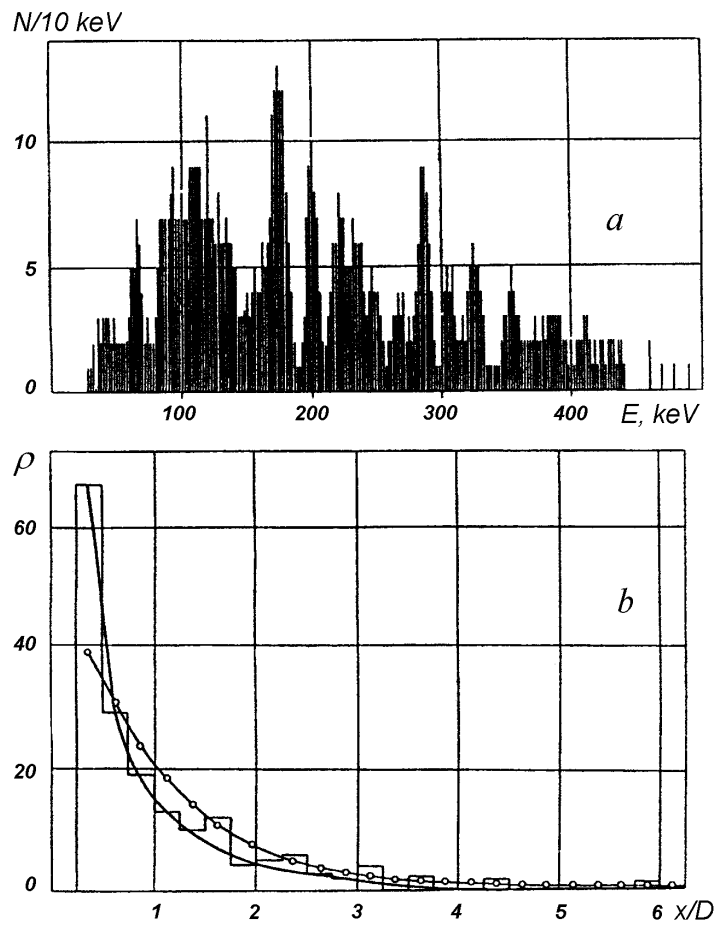


Рис. 8. Распределение энергии γ -линий в спектре реакции $^{103}\text{Rh} (n, \gamma) ^{104}\text{Rh}$ (a) и гистограмма относительных расстояний x/D между γ -линиями (b). Здесь x – расстояние между соседними γ -линиями, D – среднее расстояние; кружками обозначено пуассоновское (случайное) распределение для относительных расстояний x/D . Очевидно преобладание линий с малыми расстояниями между ними над случайно распределенными



О.И. Сумбаев



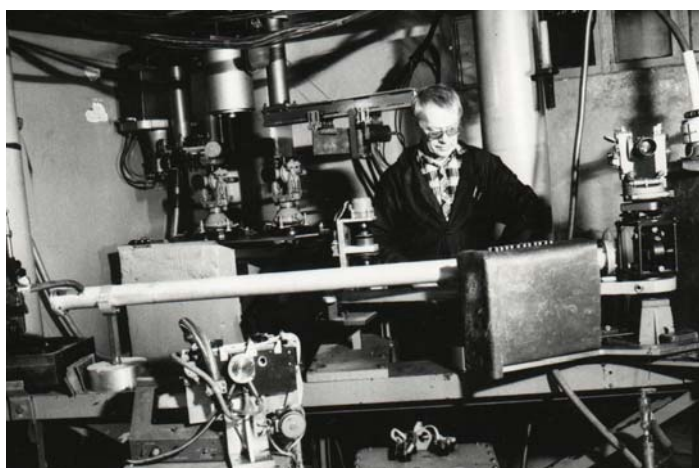
А.И. Смирнов



В.Л. Алексеев



Д.М. Каминкер



В.А. Шабуров

Вместо хорошо известного случайного распределения γ -линий было обнаружено их «притяжение», т. е. группирование (на рис. 8b можно видеть существенное превышение малых расстояний между линиями над значениями, ожидаемыми при случайном распределении). Кроме того, расстояния между группами оказались кратными. Это отвечает тенденции к эквидистантности ядерных уровней, или их «притяжению» (группированию), вместо «отталкивания», или хорошо известного случайного распределения. Более того, расстояния между группами линий (уровнями) оказались кратными. Позднее О.И. Сумбаев обратил внимание на то, что это явление очень похоже на хорошо известный эффект синхронизации для системы осцилляторов с нелинейной связью, который проявляется в так называемой «чертовой лестнице», которая описывает предпочтение такой системы колебаться на некоторых выделенных кратных частотах. Его расчеты показали поразительное сов-

падение распределений частот для таких осцилляторов и распределений энергий для ядерных уровней, хотя до сих пор ведутся дискуссии о природе и даже наличии самого явления.

В 1967 году спектрометр ГСК-2 был оборудован дополнительной сменной головкой с двумя плоскими кристаллами [17]. В результате фокусирующий спектрометр мог превращаться в двухкристальный с угловым разрешением в 1". На этом приборе при помощи дифракции впервые были наблюдаемы γ -линии из (n, γ)-реакций с энергиями до 6 МэВ. Специально построенный двухкристальный спектрометр Дж. Ноулза (Can. J. Phys., 1959, **37**, p. 203; 1962, **40**, p. 237), который считался лучшим в то время, имел угловое разрешение всего лишь 3" и диапазон энергий до 4,5 МэВ.

После этого в течение долгого времени проводились развернутые исследования в γ -спектроскопии нечетно-нечетных ядер при помощи комплекса спектрометров (ГСК-2, магнитного спектрометра BETSI, Ge(Li)-детекторов и Ge(Li)-Ge(Li)-системы). Это сотрудничество нескольких лабораторий (названное «колхозом») просуществовало до 90-х годов. Экспериментальные данные, полученные в результате исследования ядерных реакций, предоставили уникальную информацию по остаточному протон-нейтронному взаимодействию. Были созданы надежные схемы возбужденных ядерных уровней, включающие сотни γ -переходов для каждого ядра [16–22].

Уникальное разрешение прибора позволило впервые в мире провести прямые измерения γ -спектра активной зоны реактора (В.Л. Алексеев, В.Л. Румянцев, 1996 г. [23]), и таким образом были получены новые данные о γ -распаде делящихся нуклидов урана (были измерены около сотни γ -линий с хорошим разрешением в диапазоне энергий 95–250 кэВ).

Высокое разрешение прибора позволило также прямыми измерениями подтвердить упомянутое выше явление группирования линий, которое впервые косвенно наблюдалось в 1965 году (рис. 8). Суть его в том, что многие из интенсивных γ -линий спектра активной зоны реактора на самом деле оказались не линиями, а группами близких линий (дуплетами и триплетами, хорошо разрешимыми в наших экспериментах) разной природы и даже от разных ядер (см. пример на рис. 9). Это является прямым указанием на существование эффекта синхронизации в ядрах.

Также было замечено (В.В. Федоров) и продемонстрировано (В.В. Федоров, В.Л. Алексеев, В.Л. Румянцев, 2000 г. [24]), что кристалл-дифракционный метод исследования осколочной γ -активности урана (плутония) может быть полезным при решении проблемы трансмутации, а именно для контроля изотопного и элементного состава в процессе сжигания ядерных отходов.

Остаточная радиоактивность реакторного топлива на основе обогащенного ^{235}U с периодом работы (T) 3 года и последующим хранением (t) в течение 10-ти лет характеризуется удельными радиоактивностями Q (T, t) продуктов деления, которые показаны в таблице.

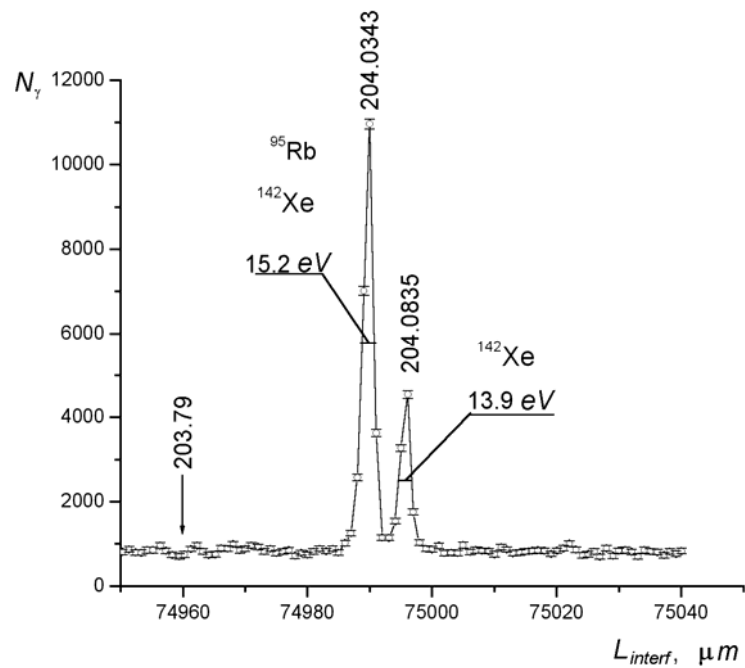


Рис. 9. Дуплет с энергией 204 кэВ и расстоянием между компонентами 50 эВ. Ранее был известен как одиночная линия. Тщательный анализ показал, что пик в 204,034 кэВ, в свою очередь, является неразложимым плотным дуплетом с расстоянием между компонентами ~ 5 эВ. N_γ – число отсчетов за 500 с

Таблица
Удельная активность продуктов деления ^{235}U

Нуклид	$T_{1/2}$	$Q(T, t)$ Ci / кВт
^{137}Cs	30 лет	2,77
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2,55 мин.	2,59
^{90}Sr	27,77 лет	2,56
^{90}Y	64 часов	2,56
^{85}Kr	10,76 часов	0,176
...
		$\Sigma = 11,5$

Из таблицы (Н.Г. Гусев и др. Радиоактивные характеристики продуктов деления. М.: Атомиздат, 1974) видно, что более 90% радиоактивности исходит только от двух долгоживущих нуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и их дочерних нуклидов ^{90}Y , $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Трансмутация (выжигание в потоке нейтронов большой интенсивности) долгоживущих радиоактивных нуклидов приводит к появлению короткоживущих нуклидов ^{91}Sr и ^{138}Cs .

На рис. 10 показаны части спектра активной зоны реактора с γ -линиями, сопровождающими распад нуклидов ^{138}Cs (рис. 10а, $E_\gamma = 462,821(33)$ кэВ) и ^{91}Sr (рис. 10б, $E_\gamma = 555,612(20)$ кэВ). Рядом с этими линиями определяются γ -линии распада нейтронообогащенного ^{99}Zr (рис. 10а, $E_\gamma = 461,035(28)$, $461,813(33)$ и $459,168(34)$ кэВ; рис. 10б, $E_\gamma = 546,144(20)$ кэВ).

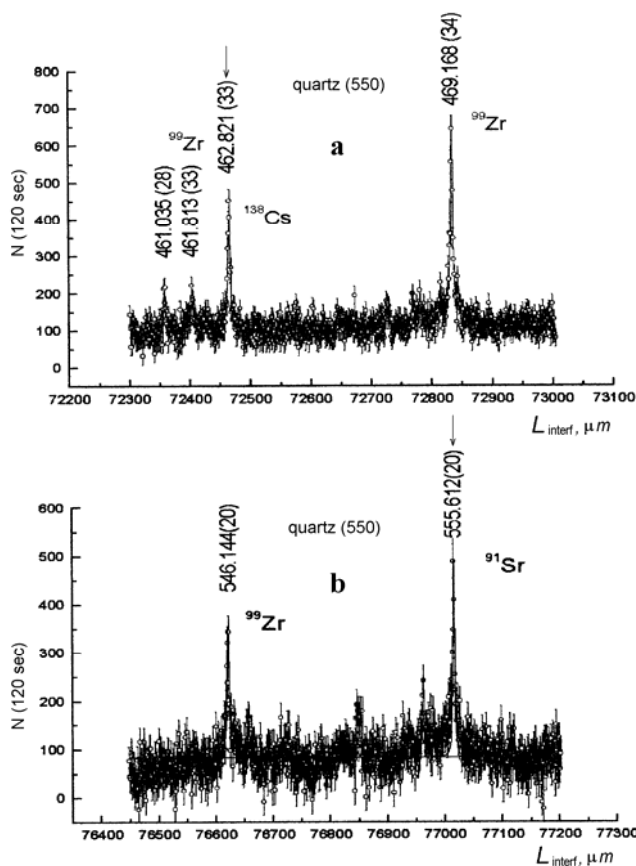


Рис. 10. Части спектра активной зоны реактора с γ -линиями, сопровождающими распад следующих нуклидов: а) ^{138}Cs ($E_\gamma = 462,821(33)$ кэВ), б) ^{91}Sr ($E_\gamma = 555,612(20)$ кэВ)

Из-за короткого периода полураспада ^{99}Zr ($T_{1/2} = 2,35$ с) интенсивности его линий на работающем реакторе насыщены и, следовательно, могут использоваться как референтные для контроля накопления и выгорания указанных нуклидов в ядерном топливе.

На рис. 11 продемонстрировано, насколько важно предельно высокое разрешение. Интенсивная линия с энергией 111,3 кэВ, приписанная ранее (NIM, 1979, **164**, р. 579) распаду ^{144}Ba , на самом деле оказалась рентгеновской линией. Это хорошо видно по наблюдаемой нами ее естественной ширине, которая даже в первом порядке отражения на порядок величины больше приборной ширины (11 эВ) соседней γ -линии ^{91}Kr 108,7856(9) кэВ. Энергия пика 111,299(6) кэВ совпадает с табличным значением энергии рентгеновской линии $K_{\beta_1}\text{U}$ (111,300 кэВ). Аналогично пик 110,422(8) кэВ, который в той же работе представлен как неизвестная γ -линия, также является рентгеновской линией с энергией, близкой к табличному значению $K_{\beta_3}\text{U}$ (110,406 кэВ).

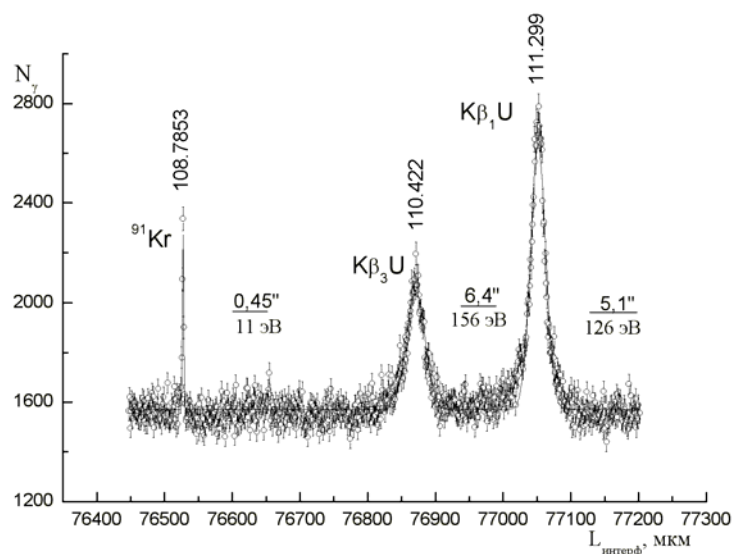


Рис. 11. Фрагмент γ -спектра в первом порядке отражения. Кварц (110).
 N_γ – число импульсов за 120 с

Эта деятельность легла в основу кандидатской диссертации В.Л. Румянцева, которую он успешно защитил в 2001 году.

Следует отметить еще один цикл пионерских работ, выполненных под руководством О.И. Сумбаева. Это работы, в которых были обнаружены и исследованы: эффект пьезоквазимозаичности, заключающийся в существенном увеличении интенсивности отражения рентгеновского излучения от монокристаллических кварцевых пластин, помещенных в сильное электрическое поле ($E \cong 6 \cdot 10^4$ В/см), эффекты право-левой асимметрии и фокусировки рентгеновских лучей при дифракции в слабо-деформированных кристаллах, а также эффект «памяти» в кварцевых монокристаллических пластинах, связанный с зависимостью скорости роста интенсивности отражения рентгеновских лучей от дозы облучения кристалла. Эти работы легли в основу диссертации Е.Г. Лапина «Экспериментальное исследование особенностей дифракции рентгеновского излучения на монокристаллах», которую он успешно защитил в 2007 г.

2. Малые энергетические смещения рентгеновских линий

2.1. Химические и изотопические смещения

Наряду с созданием новых спектрометров и развитием сферы их применения в гамма-спектроскопии в лаборатории возникло новое научное направление, связанное с исследованием рентгеновских спектров тяжелых атомов с использованием кристалл-дифракционных методов. О.И. Сумбаевым был предложен и разработан новый метод измерений малых энергетических смещений рентгеновских линий, который оказался очень плодотворным для экспериментальных исследований в самых разных областях ядерной и атомной физики, физики конденсированного вещества, а также химии редкоземельных элементов и актинидов. Метод дал несколько новых направлений исследования и успешно используется до наших дней.

В 1965 году на спектрометре ГСК-1 были проведены первые работы, в которых был обнаружен эффект химических смещений рентгеновских К-линий тяжелых элементов (О.И. Сумбаев, А.Ф. Мезенцев, Е.В. Петрович и др. [25–27]). Эти работы легли в основу кандидатской диссертации Е.В. Петровича «Экспериментальное исследование эффекта химического смещения рентгеновских линий в переходных элементах 5–6-го периода периодической таблицы», который успешно защитил ее в 1968 году. Это была первая диссертационная работа, выполненная под руководством О.И. Сумбаева. Позднее О.И. Сумбаев и А.Ф. Мезенцев на том же спектрометре впервые наблюдали эффект изотопического смещения рентгеновской $K_{\alpha 1}$ -линии для изотопов Мо [28]. После этого аналогичные исследования были проведены для изотопов Nd, Sm и Te [29, 30]. Эти работы стали основой диссертации А.Ф. Мезенцева «Исследования изменений радиусов зарядов теллурия и бария методом изотопических смещений рентгеновских линий», успешно защищенной в 1974 году. В 1970 году был впервые экспериментально наблюден эффект сверхтонкого уширения рентгеновских линий (А.С. Рыльников, А.И. Егоров, Г.А. Иванов, В.И. Марушенко, А.И. Смирнов, О.И. Сумбаев, В.В. Федоров [31, 32]), который возникает вследствие сверхтонкого взаимодействия между током атомных К-электронов и магнитным моментом ядра. Эти работы также заложили основу кандидатской диссертации «Эффект сверхтонкого уширения рентгеновских линий», которую защитил А.С. Рыльников в 1975 году. В экспериментах по измерению изотопических смещений и сверхтонкого уширения линий была достигнута рекордная точность при измерении малых смещений рентгеновских линий (~ 1 мэВ при ширине линий ≈ 10 эВ). Следует отметить, что в то время большинство ученых придерживались мнения, что невозможно измерить смещения, намного меньшие, чем ширина линии, так что от авторов потребовалась значительная энергия и мужество, чтобы отстоять и опубликовать эти результаты и заслужить признание.

На основе измерений изотопических смещений рентгеновских линий дополнительно к оптическому методу, использующему изотопические смещения оптических линий, был разработан новый метод определения зарядовых радиусов ядер [30]. Работы по химическим смещениям, проводимые на спектрометре ГСК-3, позволяющем использовать и рентгеновскую трубку, и радиоактивные источники

для возбуждения исследуемого флуоресцентного рентгеновского излучения, дали очень интересные результаты, широко используемые в настоящее время в исследованиях электронной структуры химической связи редкоземельных соединений. Впервые экспериментально обнаружена характерная зависимость (см. рис. 12) химического смещения (в результате удаления 4f-электрона) от типа рентгеновской линии («факсимиле» 4f-электрона) [33], что позволяет, например, однозначно установить опосредованное участие 4f-электрона в химической валентной связи. Экспериментально получены также «факсимиле» для s- и d-электронов, что, в свою очередь, позволяет исследовать участие этих электронов в химической связи [27, 33–36].

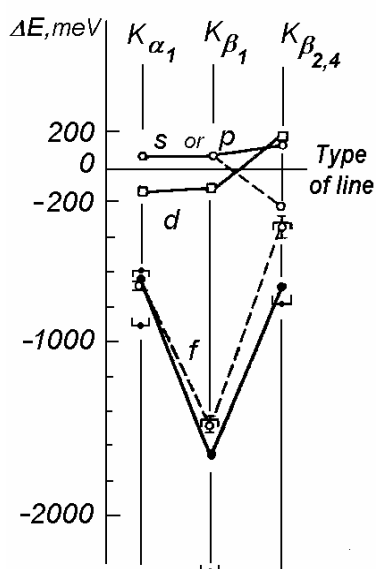


Рис. 12. Характерная зависимость («факсимиле» 4f-, 5d- и 6s (p)-электронов) энергетических смещений рентгеновских линий после удаления 4f-, 5d- и 6s (p)-электронов из электронной оболочки редкоземельных элементов от типа линии

Эти работы дали тему для кандидатской диссертации «Экспериментальное исследование эффекта химических смещений рентгеновских линий в области редкоземельных элементов. Роль f-электронов», которую защитил Ю.П. Смирнов в 1970 году.

В результате этих исследований было подтверждено существование аномальных валентностей (явление переменной валентности) и начато подробное исследование этого явления [35, 36]). Вскоре после этого метод нашел широкое применение в исследованиях по физике и химии редкоземельных элементов.

Для исследования электронной структуры атомов методом химических смещений рентгеновских линий было создано несколько кристалл-дифракционных спектрометров. Ниже представлены наиболее существенные результаты, полученные с их помощью:

1. Исследована электронная природа изоморфного фазового перехода ($\gamma \leftrightarrow \alpha$) в металлическом церию и перехода полупроводник–металл в SmS [35, 37, 38] (рис. 13). Показано, что изоморфный фазовый переход вызывается коллапсом 4f-электрона. Это стало основой диссертации В.А. Шабурова «Экспериментальное исследование электронного механизма изоморфных фазовых переходов в церию, SmS и $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ методом смещений рентгеновских линий», защищенной им в 1975 году.
2. Исследован широкий класс химических соединений редкоземельных элементов, в которых осуществляются состояния промежуточной валентности. Обнаружен ряд интересных явлений, таких как группирование валентности Ce и Yb в состоянии промежуточной валентности [39], двойной 4f-коллапс [40, 41] и др. Все это дает дополнительную информацию, необходимую для более полного понимания физики состояний с промежуточной валентностью.
3. Исследованы химические смещения рентгеновских линий соединений актинидов. Повышение точности кристалл-дифракционного прибора ГСК-1 [8] и соответствующих теоретических расчетов позволили А.В. Тюнису и др. получить «факсимиле» 5f-электрона урана (рис. 14), и тем самым появилась возможность изучать электронную структуру валентной связи актинидов в химических соединениях [42].

Эта очень сложная и длительная (с 1974 года) работа положила начало успешной защите в 1996 году А.В. Тюнисом кандидатской диссертации «Эффект химического смещения рентгеновских линий L-серии актинидов и его применение в исследовании электронной структуры урана в интерметаллидах».

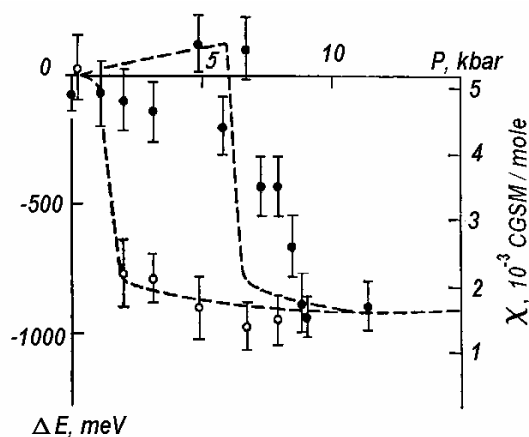


Рис. 13. Изоморфный фазовый переход под давлением в SmS в «цвете» рентгеновской линии (точки – экспериментальные изменения энергии K_{β} -линии Sm в SmS при увеличении (черные кружки) и уменьшении (светлые кружки) давления). Пунктиром приведены для сравнения данные о магнитной восприимчивости χ (правая шкала)

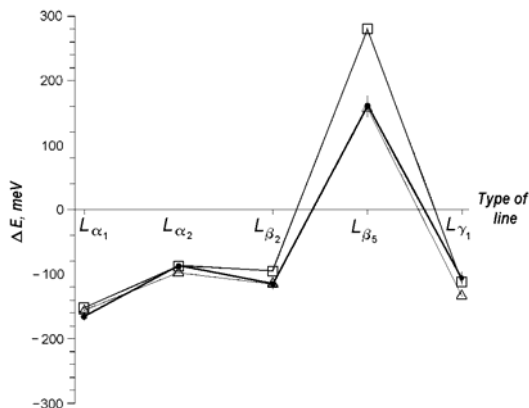


Рис. 14. Характерные зависимости энергетического смещения рентгеновской линии урана от ее типа для одного 5f-электрона, удаленного из атомной оболочки («факсимиле» 5f-электрона). Точки – экспериментальные точки, квадраты и треугольники – точки, рассчитанные двумя способами

2.1.1. Новые результаты, полученные при измерениях химических смещений

Влияние запрета по четности на появление состояния смешанной валентности в $Sm_{1-x}Gd_xS$ [43]

Экспериментально исследована электронная структура Sm и Gd в $Sm_{1-x}Gd_xS$. Помимо хорошо известного сильного возрастания валентности Sm при $x \approx 0,15$ (связываемого с электронным переходом в состояние смешанной валентности), впервые наблюдалось уменьшение валентности Sm для $x > 0,9$ (рис. 15). Это явление объясняется исчезновением 4f-5d-гибридизации соседних атомов Sm, приводящей к появлению состояния смешанной валентности (вследствие уменьшения концентрации атомов Sm и, соответственно, увеличения расстояния между ними), и интерпретируется как проявление сохранения четности.

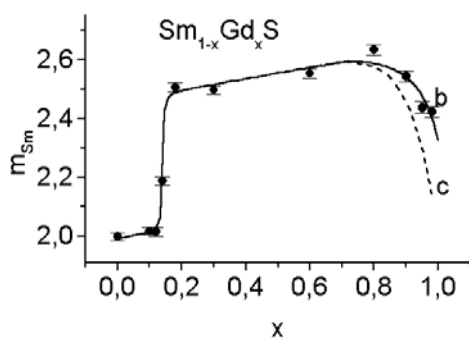


Рис. 15. Зависимость валентности самария от состава (x) в $Sm_{1-x}Gd_xS$: b – кривая, соответствующая экспериментальным точкам, c – расчетная кривая

Валентная нестабильность урана в $U(Al_{1-x}Ge_x)_3$ [44]

Исследована электронная структура U и Ge в твердых растворах $U(Al_{1-x}Ge_x)_3$. Показано, что уран имеет смешанную валентность $U^{3+}[Rn](5f^3) - U^{4+}[Rn](5f^2)$ в диапазоне концентраций ($0 \leq x \leq 1$) (здесь [Rn] указывает на заполненную оболочку атома радона), а заселенность 5f-оболочки урана возрастает на $\approx 0,28$ 5f-электронов на атом U от UAl_3 ($x = 0$) до UGe_3 ($x = 1$) (рис. 16). Электронная структура Ge близка электронной структуре металлического Ge во всем диапазоне составов ($0 \leq x \leq 1$). Не обнаружено никаких изменений в заселенности 4p-оболочки Ge до пределов экспериментальной погрешности ($\approx 0,1$ 4p-электронов на атом Ge) для x от 0,2 до 1. Установлено, что делокализация 5f-электрона U происходит в результате его перехода на s- или d-оболочку того же атома урана.

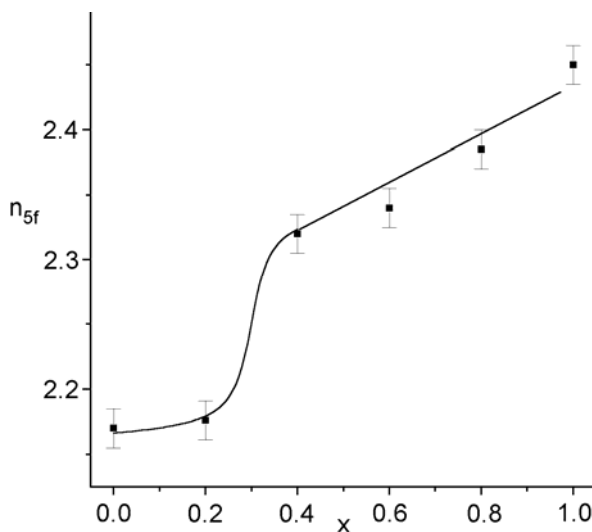


Рис. 16. Зависимость заселенности 5f-оболочки урана (n_{5f}) от состава (x) в $U(Al_{1-x}Ge_x)_3$ в соответствии со смещениями L_{a1} линий U

Электронная структура Ce и Sm в гидридах и коллапс 4f-электрона в YbH_x [45]

Исследована заселенность 4f-, 5d- и 6s-оболочек редкоземельных атомов в гидридах RH_x ($R = Ce, Sm, Yb; x \approx 2-3$). Были экспериментально определены и рассчитаны в рамках модели Хартри–Фока–Дирака (Купманса) заселенность 5d- и 6s-оболочек и заряд на них в металлах и гидридах. Уменьшение заряда на Ce и Sm, обнаруженное после перехода из металла в гидрид, однозначно говорит в пользу анионной (гидридной) модели. В YbH_x с $x > 2$ структурный переход (рис. 17) сопровождается ярко выраженным электронным переходом из двухвалентного состояния в состояние нецелочисленной валентности.

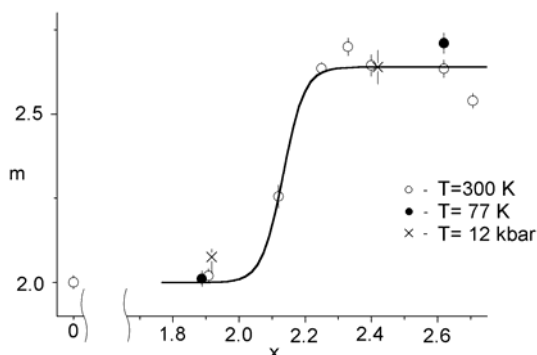


Рис. 17. Зависимость валентности иттербия от состава (x) в YbH_x

Особенности электронной структуры церия и его 4d- и 5d-партнеров в фазах Лавеса CeM_2 ($M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Ru}, \text{Rh}, \text{Os}, \text{Pt}, \text{Mg}, \text{Al}$) [46]

Метод смещений рентгеновских линий использовался для исследования электронного состояния Ce (заселенность 4f) и заселенностей 3d-, 4d- и 5d-орбиталей его партнеров в фазах Лавеса CeM_2 ($M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Ru}, \text{Rh}, \text{Os}, \text{Pt}, \text{Mg}, \text{Al}$). Показано, что валентность Ce в CeM_2 монотонно уменьшается от предельного значения $m \approx 3,35$ до $m \approx 3$ с уменьшением внутрискристаллического сжатия атомов Ce (рис. 18). Обнаружено, что заселенность внешних 4d- и 5d-орбиталей Ru, Rh и Os в фазах Лавеса больше, чем в металлах.

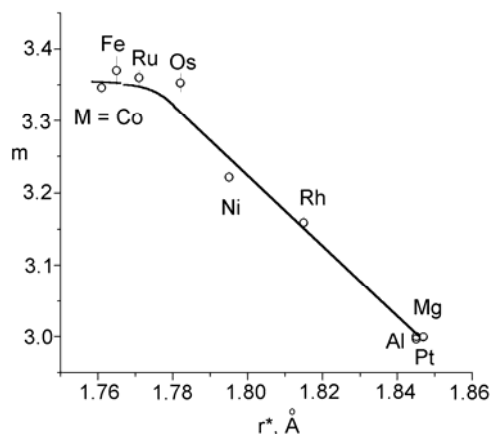


Рис. 18. Зависимость валентности церия от эффективного металлического радиуса Ce в соединении

Эволюция заселенности внешних 6s- и 5d-оболочек в редкоземельных металлах [47]

Методом смещения рентгеновских линий экспериментально измерены смещения линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\beta 1}$ всех редкоземельных металлов (РЗМ) (от La до Lu). Заселенность 6s- и 5d-оболочек редкоземельных металлов определена путем сравнения экспериментальных и теоретических смещений, полученных в рамках модели Хартри-Фока-Дирака (Купманса). Трехвалентные металлы демонстрируют монотонный переход из конфигурации $6s^{\approx 2}5d^{\approx 1}$ в конфигурацию $6s^{\approx 1}5d^{\approx 2}$ с увеличением атомного числа (рис. 19).

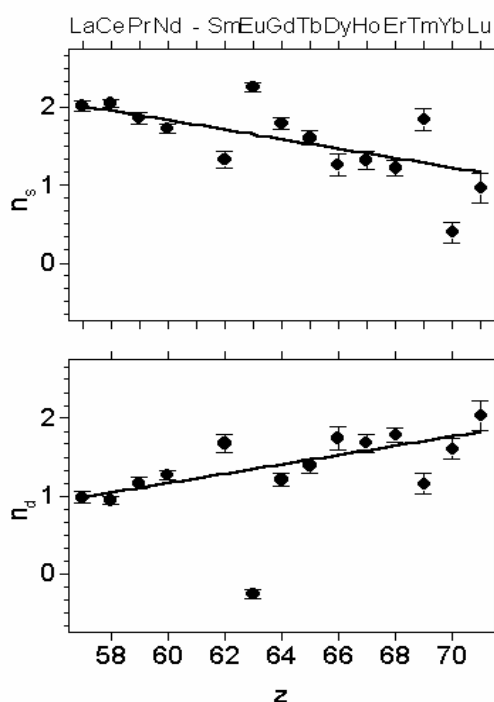


Рис 19. Зависимость заселенности 6s (n_s) и 5d (n_d) оболочек редкоземельных металлов от атомного числа (Z)

В 2006 году эти исследования получили новый импульс: по инициативе А.В. Петрунина в лаборатории создан новый кристалл-дифракционный фокусирующий спектрометр на отражение по схеме Иоганна для измерения малых энергетических смещений мягких рентгеновских линий в диапазоне 4÷10 кэВ. В результате появилась возможность исследовать смещения рентгеновских К-линий сравнительно легких 3d-металлов от Cr до Cu (в частности, манганиты, кобальтиты, ферриты и другие материалы с особыми свойствами, как, например, эффект колоссального магнетосопротивления) и L-линии практически всех редких земель (на кристалл-дифракционных приборах нахождение измерения таких линий невозможно из-за полного поглощения такого рентгеновского излучения в кристалле). В качестве дифракционного фокусирующего элемента используется изогнутая моно-

кристаллическая пластина кремния, вырезанная из стандартной коммерческой заготовки с нужной кристаллографической ориентацией и имеющая отражающую поверхность необходимого качества. Полные ширины линий составляют $\sim 4\div 5$ эВ при естественной ширине $2,5\div 3,5$ эВ. Ошибка измеряемого смещения рентгеновских линий на данном приборе составляет не более 5 мэВ (время набора статистики для этого в пределах суток) при ожидаемых эффектах не менее 50 мэВ. Прибор компактен, его размеры $\sim 1 \times 1$ м². Уже первые измерения на этом приборе принесли ряд новых и неожиданных результатов, в частности оказалось, что для 3d-металлов не только смещение рентгеновской линии зависит от их химического состояния (числа d-электронов в оболочке), но и форма рентгеновской линии, что существенно увеличивает получаемую из эксперимента информацию и расширяет возможности метода.

2.2. Сверхтонкие смещения

Предсказан и впервые экспериментально обнаружен эффект сверхтонкого смещения рентгеновских линий, возбуждаемых при внутренней конверсии, обусловленный нестатистическим заселением компонент атомной сверхтонкой структуры (А.А. Родионов, А.И. Смирнов [48]). Создана и развита теория этого эффекта (В.В. Федоров, А.А. Родионов, А.С. Рыльников [49–53]), позволившая создать новый метод измерений магнитных моментов состояний ядер практически с любыми временами жизни.

На спектрометре ГСК-3 по сверхтонкому смещению рентгеновских линий, возбуждаемых при внутренней конверсии, был измерен ряд магнитных моментов короткоживущих состояний ядер, в том числе и неизвестный ранее [49, 54].

В 1995 году на призменном бета-спектрометре [55] впервые было измерено сверхтонкое смещение К-конверсионных линий ¹⁶⁹Tm, равное $(0,32 \pm 0,15)$ эВ (А.А. Родионов [56]). Эта работа в 1996 году завершилась защитой А.А. Родионовым кандидатской диссертации под названием «Исследование сверхтонкой структуры атомных рентгеновских уровней и новая возможность определения ядерных электромагнитных моментов». Решение проблемы дальнейшего улучшения точности измерения сверхтонких энергетических смещений конверсионных линий связано с созданием нового бета-спектрометра, который в настоящее время находится в стадии создания и планируется для установки на одном из наклонных каналов реактора ПИК. Ввод в строй такого прибора существенно расширил бы современные возможности измерений магнитных моментов короткоживущих состояний ядер, поскольку электронная конверсионная линия, в отличие от рентгеновской, однозначно выделяет исследуемый ядерный переход.

3. Рентгеновская спектроскопия экзотических атомов

В 1976 году А.И. Смирновым была предложена и реализована оригинальная идея [57] использовать одну и ту же мишень, помещенную в протонный пучок, как для рождения пионов, так и для образования пионных атомов, и тем самым исполь-

зывать ее как источник рентгеновского излучения пионных атомов. Такая схема позволила в несколько сот раз увеличить выход пионных атомов по сравнению с ранее использовавшимися мишенями на выведенных пучках пи-мезонов и получила известность в мире как «гатчинская мишень». Она открыла новые возможности применения кристалл-дифракционных приборов. В частности, позволила эффективно использовать кристалл-дифракционные спектрометры для изучения рентгеновских спектров мезонных и гиперонных атомов на ускорителях ПИЯФ (Гатчина), ИФВЭ (Серпухов) и Швейцарской мезонной фабрики (PSI).

На специально сконструированном для этой цели и построенном кристалл-дифракционном спектрометре по Кошуа и мишени, установленной на протонном пучке ускорителя ПИЯФ, были точно измерены энергии переходов в пионных атомах Ca и Ti [57]. Из этих данных были получены значения массы пиона с наилучшей в то время точностью $1,5 \cdot 10^{-5}$.

На ускорителе ПИЯФ и мезонной фабрике PSI (Швейцария), на созданных в ПИЯФ спектрометрах под руководством А.И. Смирнова проведены развернутые исследования спектров пионных атомов [58–60]. Измерены энергии и ширины рентгеновских переходов и получены значения ширин 2p-уровней и их сдвигов, обусловленных сильным взаимодействием пиона с ядром от углерода до серы.

На модернизированном кристалл-дифракционном спектрометре по Кошуа с мишенью, установленной на 70 ГэВ-ном пучке протонов ускорителя в Серпухове, измерены энергии рентгеновского излучения K^- - и Σ^- -атомов углерода [61, 62]. В результате определены значения масс K^- -мезона (относительная ошибка $1,2 \cdot 10^{-5}$) и Σ^- -гиперона ($3,3 \cdot 10^{-5}$) с наилучшей на тот момент точностью.

А.Ф. Мезенцевым, К.Е. Кирьяновым и др., при сотрудничестве с Московской мезонной фабрикой, был создан новый двухкристальный дифракционный спектрометр с плоскими кристаллами для исследования легчайших экзотических атомов [63, 64]. В диапазоне энергий от 3 до 100 кэВ спектрометр позволяет проводить измерения с относительной точностью $(1-3) \cdot 10^{-6}$ и относительным разрешением по энергии до 10^{-5} .

Для этого прибора предложена широкая программа исследований [63]. В частности, планируются эксперименты по новым измерениям массы отрицательного пи-мезона (что необходимо для определения массы мюонного нейтрино), по измерению смещений рентгеновских пи-атомных линий, вызванных сильным взаимодействием, и естественных ширин 1s-состояния пионных атомов водорода и дейтерия для более точного определения длин пион-нуклонного рассеяния. Показано (К.Е. Кирьянов [65]), что спин-зависимое пион-нуклонное взаимодействие приводит к сверхтонкому расщеплению 2p-уровней легчайших пионных атомов. Такие расщепления можно измерять для определения констант этого взаимодействия. Также предложено определение ядерных квадрупольных моментов по измерениям пионных рентгеновских спектров.

4. Излучение, дифракция и каналирование заряженных частиц

Эти работы стартовали в нашей лаборатории в начале 1970-х годов. Следует заметить, что каналирование – это явление, очень близкое по своей природе динамической дифракции заряженных частиц. Началось все с того, что был предсказан (В.В. Федоров, 1972) и теоретически исследован (В.В. Федоров, К.Е. Кирьянов, А.И. Смирнов [66–68]) новый вид электромагнитного излучения (маятниковое излучение) дифрагированных в монокристалле электронов. Исследования маятникового излучения показали, что оно аналогично (для электронов с энергиями до нескольких МэВ) излучению осциллирующих мультиполей, проходящих через преломляющую среду с околосветовой или сверхсветовой скоростью (например, в случае четырехволновой дифракции электрон одновременно излучает как магнитный и электрический диполи, так и электрический квадруполь) [68–70]. Также было показано [68], что зависимость частоты фотона от направления излучения частицами, движущимися с околосветовой или сверхсветовой скоростями, определяется нормальным или аномальным эффектами Доплера соответственно. Впервые появилась реальная возможность исследовать данное явление, предсказанное И.М. Франком еще в 1942 году.

Первые результаты наших работ [66–68] стимулировали появление в 1975 году работы, посвященной аналогичному излучению каналирующих частиц (А.А. Воробьев, В.В. Каплин, С.А. Воробьев (Томская группа), NIM, 1975, **127**, p. 265). Позднее, в 1976 году практически одновременно были опубликованы еще две работы по излучению при каналировании (В.Г. Барышевский, И.Я. Дубовская (Минск), ДАН СССР, 1976, **231**, p. 1335; М.А. Кумахов (Москва), Phys. Lett., 1976, **57A**, p. 17). Эти работы, в свою очередь, дали начало многочисленным дальнейшим теоретическим и экспериментальным исследованиям такого типа излучения, а также очень активной полемике и спорам (включая борьбу за приоритет) между различными научными группами (иногда полемика выходила за рамки научной).

В 1979 году О.И. Сумбаев [71–74] обратил внимание на то, что в случае изогнутого кристалла для протонного пучка возможно явление объемного захвата в режим каналирования. Протон находит в изогнутом кристалле точку, для которой угол между направлением пучка и кристаллографической плоскостью становится меньше критического (выполняется условие каналирования), аналогично тому, как рентгеновские лучи в изогнутом кристалле способны находить в объеме точку, удовлетворяющую условию Брэгга. Это существенно увеличивает угол захвата в режим каналирования точно так же, как это происходит за счет эффекта квазимозаичности в случае рентгеновской дифракции в упругодеформированных кристаллах.

Явление объемного захвата было подтверждено экспериментально на ускорителе ПИЯФ [71]. Оно открыло новую возможность увеличения интенсивности каналирующих частиц при помощи использования пучков с угловой расходимостью, превышающей угол Линдхарда более чем на два порядка, и позволило провести ряд экспериментов с каналирующими частицами, в которых были получены новые ин-

тересные результаты. Для регистрации каналирующих частиц была создана уникальная установка [71], сочетающая в себе рабочий изогнутый кристалл с несколькими полупроводниковыми детекторами на том же кристалле. Факт каналирования частицы фиксировался по малой величине сигналов от ионизационных потерь во всех детекторах (см. рис. 20, 21).

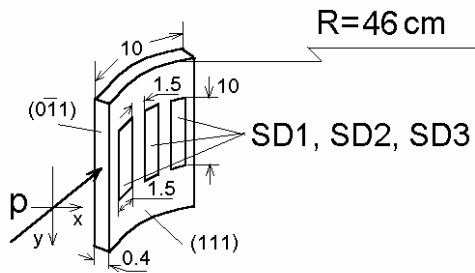


Рис. 20. Три полупроводниковых детектора, ПД1, ПД2, ПД3, реализованы на изогнутом кристалле кремния, в котором происходит каналирование частиц («живая мишень» [74])

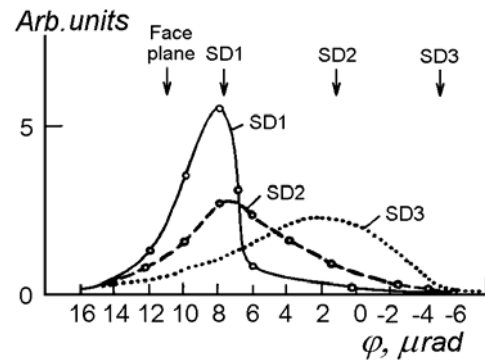


Рис. 21. Эффект объемного захвата. Зависимости числа частиц с малой амплитудой сигнала в ПД1, ПД2, ПД3 от угла поворота кристалла. Эти распределения существенно шире угла Линдхарда ($\approx 0,12$ мкрад), что свидетельствует о наличии захвата протонов в режим каналирования по всей длине изогнутого кристалла

Используя эффект объемного захвата и указанную установку, экспериментально наблюдали новое явление фокусировки пучка частиц высоких энергий [75, 76]. На новой установке, созданной в нашем институте, на ускорителе FNAL (Батавия, США) был впервые проведен эксперимент [77] по определению магнитного момента Σ^+ -гиперона путем измерения угла поворота его спина в результате каналирования в изогнутом монокристалле (такой поворот спина был предсказан В.Г. Барышевским). Результаты этого эксперимента (проведенного В.М. Самсоновым) следующие: 1) впервые продемонстрировано существование эффекта поворота спина при каналировании, 2) разработан новый метод измерения аномальных магнитных моментов релятивистских частиц, 3) впервые при помощи этого метода был измерен магнитный момент Σ^+ -гиперона.

Исследование явлений каналирования далее развивалось в работах, проводимых под руководством А.И. Смирнова. Было предсказано и экспериментально наблюдалось явление фокусировки протонного пучка для протонов с энерги-

ей 70 ГэВ, каналирующих в изогнутом кристалле со специальным срезом передней грани пластины кристалла [78]. В работах [78, 79] это явление экспериментально подтверждено. Линейные размеры пучка в фокусе были $15 \times 0,05 \text{ мм}^2$. Установка второго кристалла, фокус которого совмещен с фокусом первого, позволила трансформировать сфокусированный (в линию) расходящийся пучок в параллельный (в горизонтальной плоскости) на выходе из второго кристалла. Разработана технология изготовления отклоняющего и фокусирующего устройств на основе кристаллов для нужд кристаллооптики пучков заряженных частиц (см. рис. 22).

Работы по каналированию были удостоены Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники.

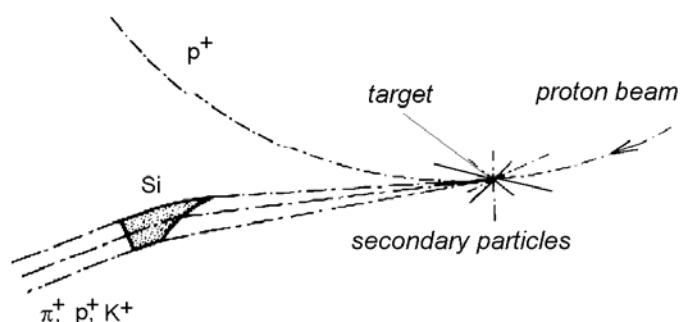


Рис. 22. Возможная схема применения фокусирующего кристалла для выведения пучка вторичных частиц из ускорителя

Созданы и испытаны рентгеновские томографы детекторов для физики высоких энергий [80, 81]. Сформированный кристаллом узкий пучок рентгеновских квантов в заданной системе координат и обнаруженный несколькими детекторами позволяет определять положение нитей детектора с точностью выше 1 мкм. В настоящее время установка используется для юстировки детекторов на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН).

5. Динамическая дифракция нейтронов и поиск электрического дипольного момента нейтрона

Исследования по динамической дифракции нейтронов в плоских и в изогнутых совершенных кристаллах в нашей лаборатории начались в 1981 году с работы О.И. Сумбаева [82], посвященной обсуждению возможности использовать изогнутый кристалл в качестве нейтронного интерферометра. В этой работе было показано, что изогнутый кристалл, в силу расщепления траекторий Като может себя вести как 3-кристальный интерферометр. Появилась идея использовать такой интерферометр для наблюдения гравитационного эффекта путем точных измерений и сравнения маятниковых картин для двух положений установки. Была развита теория этого эффекта (О.И. Сумбаев, В.В. Федоров), а также предложен (О.И. Сумбаев) и

разработан (В.Л. Алексеев) метод измерения маятниковых биений при динамической дифракции нейтронов. Вскоре была создана установка (аналогичная показанной на рис. 23) для исследования динамической дифракции нейтронов (Е.Г. Лапин, Е.К. Леушкин, В.Л. Румянцев).

При помощи этой установки впервые наблюдался гравитационный эффект как изменение контраста маятниковой картины (аналогичной приведенной на рис. 24), вызванное переверотом всей установки из-за гравитационного поля, для нейтронов, дифрагированных в слабо изогнутом монокристалле [83].

Затем исследования изменили свое направление, когда стало понятно (В.В. Федоров, О.И. Сумбаев), что сильное внутрикристаллическое электрическое поле (ранее предсказанное В.В. Федоровым), которое действует на нейтрон, дифрагирующий в нецентросимметричном кристалле, может достигать значений более 10^8 В/см даже в случае обычных кристаллов α -кварца, использовавшихся в гравитационных и других экспериментах по нейтронной дифракции. Такие поля появляются в нецентросимметричных кристаллах вследствие смещения положений «ядерных плоскостей» (максимумов периодического ядерного потенциала кристалла) относительно «электрических» (максимумов электрического потенциала). Из-за концентрации нейтронов на максимумах ядерного потенциала (или между ними) нейтрон оказывается в сильном межплоскостном электрическом поле (рис. 25).

Это поле впервые было измерено (В.Л. Алексеев, В.В. Федоров, Е.Г. Лапин, Е.К. Леушкин, В.Л. Румянцев, О.И. Сумбаев, В.В. Воронин) в эксперименте (рис. 23), проведенном на пучке нейтронов реактора ВВР-М, по динамической дифракции поляризованных нейтронов в совершенном кристалле кварца. Измерялся сдвиг фазы маятниковой картины (рис. 24), при перевероте спина нейтрона за счет швингеровского взаимодействия движущегося нейтрона с межплоскостным электрическим полем [84–86].

Экспериментально полученная величина электрического поля, действовавшего на нейтрон $(2,1 \pm 0,12) \cdot 10^8$ В/см, совпала с теоретической.

Такие поля более чем на четыре порядка превосходят поля, используемые в самом чувствительном на настоящий момент магнитнорезонансном методе с применением ультрахолодных нейтронов (метод УХН). Естественной мыслью было использовать эти внутрикристаллические поля для поиска ЭДМ. Однако величина поля оказалась еще недостаточной для достижения чувствительности, полученной в методе УХН (который сейчас развивается в ПИЯФ (В.М. Лобашев, А.П. Серебров) и, независимо, группой ученых Резерфордской лаборатории университета Сассекса (Великобритания) и ИЛЛ (Гренобль, Франция)).

В 1990 году возникла идея (В.В. Федоров): для увеличения чувствительности дифракционного метода использовать лауэвскую дифракцию поляризованных нейтронов под углами Брэгга, близкими к 90° , что существенно (более чем на порядок) увеличивает время, которое нейтрон проводит в кристалле под действием сильного электрического поля.

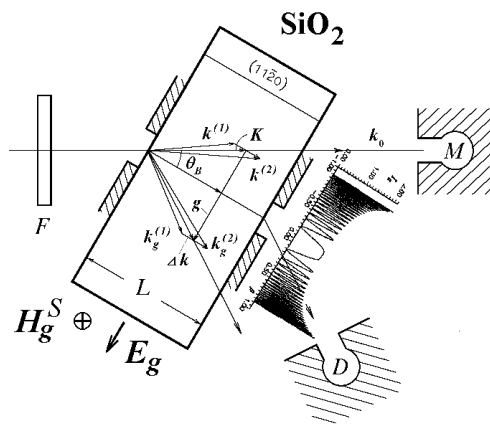


Рис. 23. Схема установки для наблюдения маятниковой картины для различных ориентаций спина нейтрона. F – флиппер, D – детектор нейтронов, M – монитор пучка

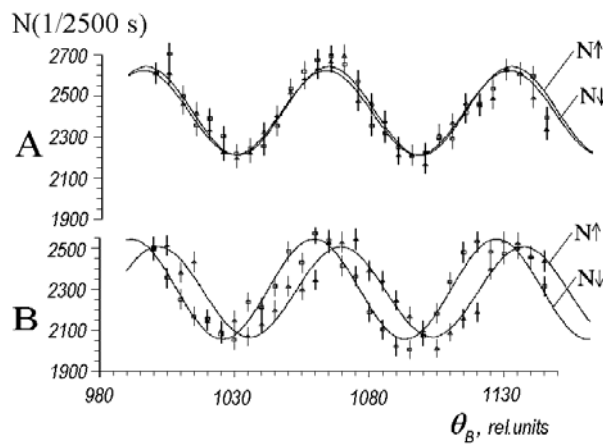


Рис. 24. Маятниковые осцилляции интенсивности в зависимости от угла Брэгга. Стрелки \uparrow, \downarrow показывают противоположные проекции спина на некоторое направление. Θ – угол между этим направлением и направлением швингеровского магнитного поля H_g^S . А) $\Theta = 90^\circ$, В) $\Theta = 0^\circ$. Фазовый сдвиг в В соответствует электрическому полю, равному $E_{110} = (2,10 \pm 0,12) \cdot 10^8$ В/см. Отсутствие эффекта в А дает следующую приблизительную оценку для ЭДМ: $D_n < 10^{-20}$ э·см

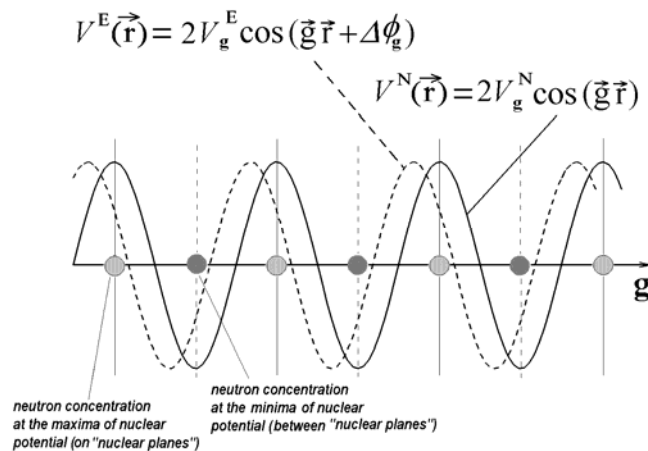


Рис. 25. Электрическое поле, возникающее вследствие концентрации дифрагирующих нейтронов на «ядерных плоскостях» кристалла (или между ними) и из-за относительного смещения электрических и ядерных плоскостей для нецентросимметричных кристаллов

С этой целью в 1990 году был разработан новый дифракционный метод с использованием двух кристаллов (В.В. Федоров, В.В. Воронин, Е.Г. Лапин [87]). Более того, было показано [87], что для случая дифракции Лауэ чувствительность метода может быть увеличена более чем на порядок для углов Брэгга, близких к прямому, и может стать сравнимой с чувствительностью метода УХН. Также было проведено развернутое теоретическое исследование динамической дифракции нейтронов, был получен ряд новых результатов. В частности, был предсказан эффект деполяризации нейтронов для симметричной схемы дифракции по Лауэ поляризованных нейтронов в нецентросимметричном кристалле. Этот эффект был принят за основу для нового (более простого, чем двухкристальный, но имеющего некоторые преимущества) метода поиска ЭДМ, названного поляризационным методом (В.В. Федоров, В.В. Воронин, Е.Г. Лапин, О.И. Сумбаев [88, 89]).

Но только экспериментальное исследование динамической нейтронной дифракции по Лауэ в нецентросимметричном кристалле для углов Брэгга, близких к 90° , могло ответить на вопрос относительно действительной чувствительности дифракционного метода к ЭДМ нейтрона. Для экспериментального исследования упомянутых дифракционных явлений была предложена несколько экзотическая схема установки (рис. 26) с использованием для измерений прямого дифракционного пучка [88, 89].

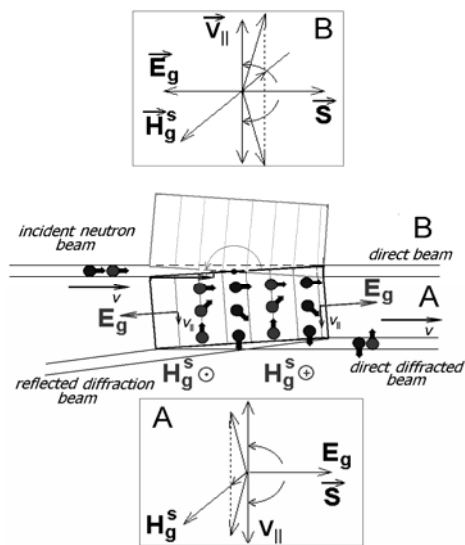


Рис. 26. Нейтроны внутри кристалла движутся вдоль кристаллографических плоскостей почти перпендикулярно направлению падения (это ведет, в частности, к существенному замедлению движения нейтрона в кристалле). Спины нейтрона для двух блоховских состояний нейтронов (сосредоточенных на «ядерных плоскостях» и между ними) будут поворачиваться в противоположных направлениях под действием противоположных полей. При угле поворота, равном $\pi/2$, пучок дифрагированных нейтронов станет полностью деполаризованным. Для плоскости (110) α -кварца это произойдет при толщине кристалла $L_0 = 3,5$ см. Существование ЭДМ приведет к небольшой поляризации вдоль швингеровского магнитного поля

В 1999 году была создана пилотная установка и на пучке нейтронов реактора ВВР-М получены первые экспериментальные результаты (В.В. Воронин, Е.Г. Лапин, С.Ю. Семенихин, В.В. Федоров [90–92]). Поскольку в прямой дифракционный пучок вносят вклад все нейтроны, продифрагировавшие на всех отражающих плоскостях кристалла, для которых удовлетворяются условия Брэгга (рис. 26), для отбора нейтронов, продифрагировавших на необходимой системе плоскостей, был предложен времяпролетный метод (В.В. Воронин). Полученные результаты таковы:

1. Впервые было проведено исследование динамической дифракции нейтронов для углов Брэгга вплоть до 87° при помощи прямого дифракционного пучка и кристалла большой толщины ($\approx 3,5$ см).
2. С помощью времяпролетного метода экспериментально наблюдалась существенная задержка дифрагирующего нейтрона внутри кристалла для углов Брэгга, близких к 90° [90, 92–94] (рис. 27, 28). Измеренная скорость прохождения нейтрона сквозь кристалл для угла дифракции, равного 87° , оказалась (40 ± 1) м/с (скорость падающего на кристалл нейтрона равнялась 808 м/с). Измеренное значение скорости совпало с теоретическим.
3. Экспериментально наблюдался предсказанный эффект деполаризации нейтронного пучка для случая дифракции по Лауэ в нецентросимметричном кристалле α -кварца [90, 92–94]. Экспериментально продемонстрировано, что эффект (и, соответственно, межплоскостное электрическое поле, действующее на нейтрон) не зависит от угла Брэгга (см. рис. 29) и совпадает с теоретическими предсказаниями и с результатами предыдущих экспериментов. Это подтверждает возможность увеличения более чем на порядок чувствительности метода к ЭДМ нейтрона для углов дифракции, близких к 90° . Для угла Брэгга, равного 87° ,

чувствительность метода к ЭДМ нейтрона увеличивается приблизительно в двадцать раз по сравнению с углом 45° .

4. Экспериментально показано, что значение Et , которое определяет чувствительность метода к ЭДМ нейтрона, в нашем случае составляет $\approx 0,2 \cdot 10^6$ В·с/см [90–92] (для угла Брэгга, равного 87°), что сравнимо с его значением в методе УХН ($\approx 0,6 \cdot 10^6$ В·с/см в последнем эксперименте ИЛЛ).

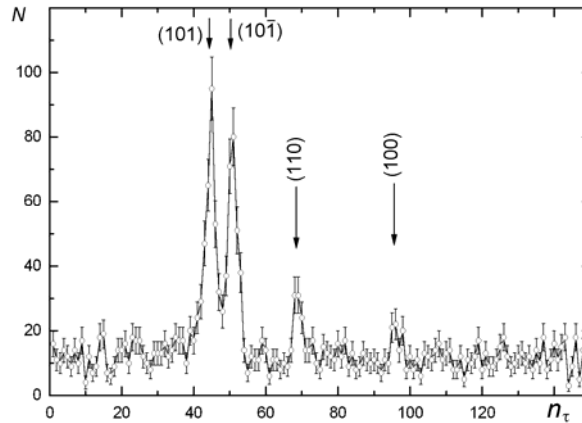


Рис. 27. Пример времяпролетного спектра прямого дифракционного пучка для кристалла кварца (угол Брэгга $\theta_B = 75^\circ$ для отражения (110)). Здесь n_τ – порядковый номер времяпролетного канала. Ширина канала равна $\approx 51,2$ мкс. N – число набранных событий. Полное время накопления для всего спектра равно 5 часам. Разные пики соответствуют дифракции на разных системах кристаллографических плоскостей. Пик от плоскости (110) заметно смещается относительно других, когда угол Брэгга для нее приближается к 90°

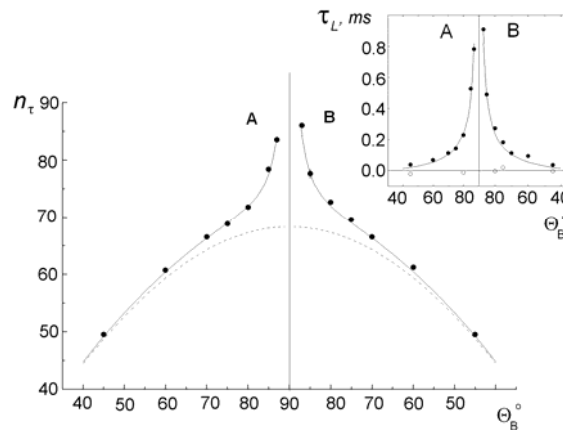


Рис. 28. Времяпролетная зависимость от угла Брэгга для нейтронов, дифрагированных плоскостью (110) кристалла кварца. А и В – два положения кристалла с одинаковыми углами Брэгга, антипараллельные друг другу. Значение n_τ – число временных каналов, пропорциональное общему времени пролета, τ_L – время задержки нейтрона в кристалле

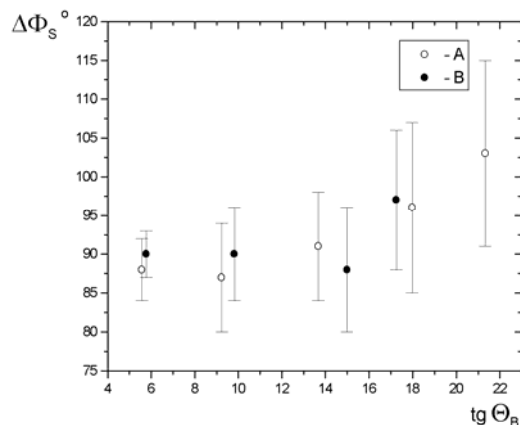


Рис. 29. Зависимость угла поворота спина нейтрона $\Delta\Phi_S$ (из-за швингеровского взаимодействия магнитного момента движущегося нейтрона с внутрикристаллическим электрическим полем) от тангенса угла Брэгга для плоскости (110) кристалла кварца толщиной $L = 3,5$ см. А и В соответствуют двум позициям кристалла. Эти данные дают следующую оценку ЭДМ: $D_n < 10^{-22}$ э·см

Для холодных нейтронов, проходящих через нецентросимметричный кристалл в направлениях и с энергиями, далекими от брэгговских, был предсказан, а в 2001 году и обнаружен нейтронооптический эффект вращения спина нейтрона [94–97]. Знак и величина угла поворота спина нейтрона зависят от энергии и направления движения нейтрона.

На основании экспериментальных результатов [92–99], полученных на реакторе ВВР-М, а также в тестовых экспериментах [99] на высокопоточном реакторе Института Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция) был предложен проект кристалл-дифракционного эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона поляризационным методом (ДЭДМ) на уровне точности $\approx 6 \cdot 10^{-25}$ э·см/сут. Такая чувствительность реально достижима уже для имеющихся в наличии кристаллов α -кварца. Использование других кристаллов с более сильными электрическими полями может улучшить чувствительность до уровня $\sim 10^{-26}$ э·см/сут.

Недавно была предложена новая схема эксперимента (В.В. Воронин) и впервые наблюдался удвоенный эффект поворота спина нейтрона в нецентросимметричном кристалле кварца для брэгговски отраженных нейтронов от деформированной области вблизи выходной грани кристалла [100], рис. 30. Этот эффект обусловлен швингеровским взаимодействием магнитного момента нейтрона с электрическим внутрикристаллическим полем и зависит от величины деформации кристалла вблизи его выходной поверхности. Величина электрического поля, действовавшего на нейтрон в кристалле кварца, в этом случае оказалась равной $\sim 10^8$ В/см. В такой схеме поле действует на нейтрон на протяжении всего времени его прохождения сквозь кристалл в одном направлении и обратно. Это время ограничено только размерами кристалла (в нашем случае 14 и 27 см) и длиной поглощения нейтронов. Наблюдение спиновых эффектов в этой схеме дает реальную перспективу существенно улучшить чувствительность эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом и достичь чувствительности на уровне $\sim 10^{-27}$ э·см/сут.

Более того, такая схема эксперимента из-за относительно низких требований к качеству кристалла может быть применена, например, для поиска Т-нечетной части нейтрон-ядерного взаимодействия, ранее рассмотренного В.Г. Барышевым, при помощи нейтронов с энергиями, близкими к энергии Р-волнового резонанса.

Суть данной схемы состоит в следующем. Для того чтобы наблюдать поворот спина для нейтронов, пропускаемых сквозь кристалл в схеме брэгговской дифракции, мы должны создать небольшое отклонение (порядка брэгговской ширины) от брэгговского условия. В противном случае нейтроны отразятся от входной поверхности кристалла и никогда не попадут внутрь кристалла, где существует сильное электрическое поле. Чтобы выделить нейтроны, проходящие через основную часть кристалла с необходимым отклонением от условия Брэгга, мы использовали небольшое контролируемое изменение межплоскостного расстояния Δd (вызванное, например, нагреванием или охлаждением) вблизи выходной грани кристалла. Тогда некоторая часть нейтронов, прошедшая через основную толщину кристалла, отразится назад от этой малой части кристалла. Для этих дифрагированных назад нейтронов параметр отклонения от условия Брэгга в основной части кристалла будет определяться величиной Δd , и таким образом они будут проходить внутри кристалла под действием соответствующего электрического поля в обоих направлениях – в одну сторону и обратно.

Для создания такого изменения межплоскостного расстояния использовались нагрев и охлаждение выходной грани кристалла.

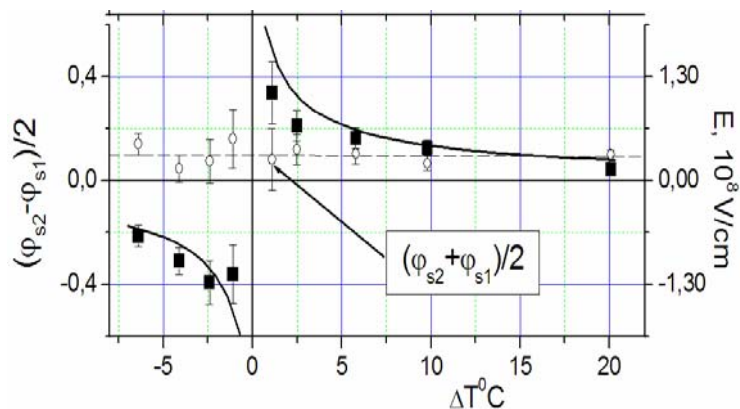


Рис. 30. Экспериментальная зависимость угла поворота спина от разницы температур ΔT между выходной гранью и основной частью кристалла. Разные знаки ΔT соответствуют разным знакам параметра отклонения от брэгговского условия и, в свою очередь, противоположному электрическому полю, действующему на нейтрон (правая ось ординат), и, таким образом, противоположному направлению поворота спина (левая ось ординат). φ_{s1} и φ_{s2} – соответственно углы поворота спина для двух положений кристалла, отличающихся поворотом на 180° и, таким образом, для противоположных электрических внутрикристалльных полей

Идея эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона, основанная на похожей, но несколько видоизмененной схеме поиска эффекта вращения спина нейтрона за счет ЭДМ при прохождении через нецентросимметричный кристалл, показана на рис. 31.

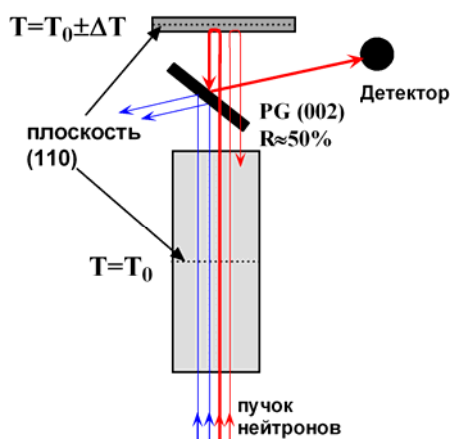


Рис. 31. Принципиальная схема эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при отражении под $\pi/2$. Длина волны и энергия нейтрона, прошедшего через рабочий кристалл и отраженного вторым кристаллом, определяются межплоскостным расстоянием d отражателя. Этой величиной можно управлять путем изменения температуры

Рабочая система кристаллографических плоскостей параллельна входной грани кристалла (так называемая схема дифракции по Брэггу). Нейтроны с длинами волн, отличными от брэгговских, проходят через толстый рабочий кристалл и отражаются вторым кристаллом-отражателем с регулируемым межплоскостным расстоянием. Затем полупрозрачным зеркалом из пиролитического графита они направляются на детектор. Нейтроны, которые удовлетворяют условию Брэгга для первого кристалла, отражаются от его входной грани и не попадают на второй кристалл. На нейтроны внутри кристалла действует сильное электрическое поле, по величине и знаку зависящее соответственно от величины и знака параметра отклонения от условия Брэгга, который определяется величиной отклонения длины волны нейтрона от брэгговской $\lambda - \lambda_{\text{в}}$. Кристалл-отражатель – это тонкий кристалл, межплоскостное расстояние которого регулируется его нагревом или охлаждением. При его помощи можно выделять нейтроны с определенной длиной волны, прошедшие через рабочий кристалл в различных по знаку и величине электрических полях, т. е. фактически управлять знаком и величиной электрического поля, под действием которого находился в кристалле регистрируемый нейтрон, не прикасаясь к самому кристаллу. Были проведены предварительный анализ и серия тестовых экспериментов по прохождению поляризованных нейтронов через кристалл кварца на реакторе ВВР-М ПИЯФ. Показано, что данная методика слабо чувствительна к возможным систематическим (ложным) эффектам, и уже на нынешнем уровне развития экспериментальной техники возможно получить на порядок лучшее ограничение на ЭДМ нейтрона и достичь $\sim (4-6) \cdot 10^{-27}$ э·см за ближайшие 3-4 года.

Дальнейшее продвижение по точности еще как минимум на порядок может быть достигнуто при использовании нового класса нецентросимметричных кристаллов, таких как BSO, PbO и др.

Результат одного из первых экспериментов по наблюдению вращения спина нейтрона за счет швингеровского взаимодействия, полученный в схеме с двумя кристаллами, показан на рис. 32. Чтобы швингеровское взаимодействие было отлично от нуля, угол между направлением движения нейтрона и кристаллографической плоскостью должен быть отличен от 90° , здесь он равен 86° .

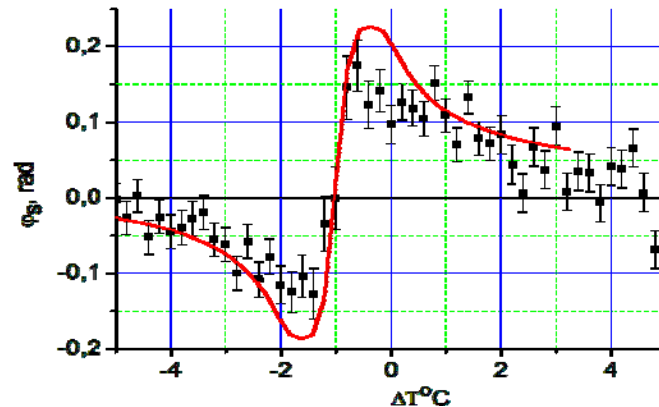


Рис. 32. Зависимость угла поворота спина нейтрона от разницы температур ΔT между кристаллами. Разные знаки ΔT соответствуют разным знакам параметра отклонения от брэгговского условия для нейтронов в рабочем кристалле и, соответственно, противоположным электрическим полям, действующим на нейтрон. Максимальная величина угла поворота спина соответствует величине поля $\sim 10^8$ В/см

Параллельно получен еще один интересный результат. Из рисунка следует, что нулевой эффект (который должен соответствовать одинаковым межплоскостным расстояниям кристаллов) имеет место при разности температур, отличной от нуля. Это означает, что основной рабочий кристалл (искусственно выращенный кварц в г. Александров Московской обл.) и кристалл-отражатель (вырезанный из куска естественного кварца, добытого на Урале) имеют разные межплоскостные расстояния и в то же время обладают высокой степенью совершенства (естественная мозаичность меньше 1 угл. сек.). Природа этой разницы до сих пор не вполне понятна.

Высокая чувствительность двухкристалльной схемы к разности межплоскостных расстояний позволила создать метод сравнительного анализа объемного совершенства кристаллов больших объемов независимо от формы кристаллов, основанный на дифракции под углом $\theta_B = 90^\circ$. Различие в межплоскостных расстояниях исследуемого кристалла и реперного кристалла-отражателя приведет к смещению двухкристалльной линии при изменении межплоскостного расстояния второго кристалла, которое варьируется за счет теплового расширения путем изменении его температуры (рис. 33).

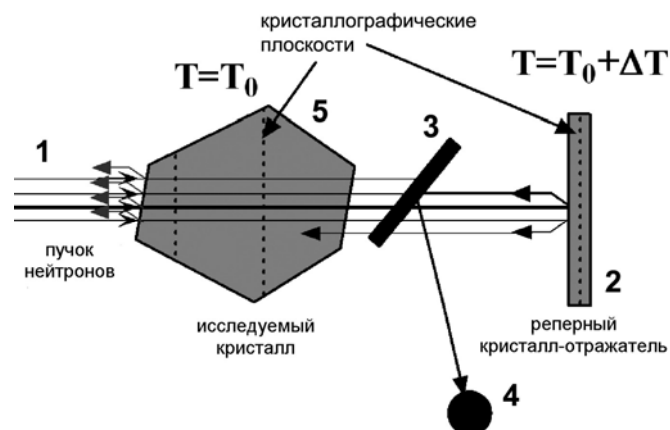


Рис. 33. Принципиальная схема установки для интроскопии совершенных кристаллов

Результаты исследований по дифракции нейтронов и нейтронной оптике нецентросимметричных кристаллов стали основой докторской диссертации В.В. Воронина «Дифракция нейтронов и другие нейтроннооптические эффекты в нецентросимметричных кристаллах и их использование для исследований в области фундаментальной физики», успешно защищенной им в 2006 г.

Литература

1. Лукирский П.И., Сумбаев О.И. Двухметровый кристалл-дифракционный γ -спектрометр. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1956, **20**, с. 903–908.
2. Сумбаев О.И., Смирнов А.И., Зыков В.С. Эффект Моссбауэра на изотопах вольфрама. ЖЭТФ, 1962, **42**, в. 1, с. 115–123.
3. Сумбаев О.И. Отражение γ -излучения от изогнутых кварцевых пластин. ЖЭТФ, 1957, **32**, № 6, с. 1276–1279.
4. Сумбаев О.И. К теории фокусирующих кристалл-дифракционных спектрометров. (Выбор системы отражающих плоскостей изогнутого кристалла.) Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, **23**, № 7, с. 880–882.
5. Сумбаев О.И. Кристалл-дифракционные гамма-спектрометры. М.: Госатомиздат, 1963.
6. Алексеев В.Л. Дифракция на изогнутом кристалле (к расчету фокусирующих γ -спектрометров). Препринт ФТИ–086, Ленинград, 1968, 13 с.
7. Сумбаев О.И. Экспериментальное исследование эффекта упругой квазимозаичности. ЖЭТФ, 1968, **54**, с. 1352–1360.
8. Тюнис А.В., Самсонов В.М., Сумбаев А.И. Кристалл-дифракционный спектрометр для измерения химических смещений рентгеновских линий L-серии актинидов. Препринт ЛИЯФ–151, Ленинград, 1975, 16 с.
9. Самсонов В.М. Изгиб пластины в фокусирующих кристалл-дифракционных рентгеновских и гамма-спектрометрах. Препринт ЛИЯФ–278, Ленинград, 1976, 40 с.

10. Sumbaev O., Smirnov A. 4-meter Cauchois spectrometer for neutron-capture γ -radiation research. Program and theses of the XII Annual Conference on Nuclear Spectroscopy (M., L., 1962), p. 85. Nucl. Instr. and Meth., 1963, **22**, p. 125–137.
11. Smirnov A.I., Shaburov V.A., Alexeev V.L., Kaminker D.M., Rylnikov A.S., Sumbaev O.I. A device for precise measurements of radiation energy from the n, γ -reaction. Nucl. Instr. and Meth., 1968, **60**, p. 103–108.
12. Алексеев В.Л., Леушкин Е.К., Румянцев В.Л., Самсонов В.М. Повышение разрешающей способности фокусирующих кристалл-дифракционных гамма-спектрометров. Препринт ЛИЯФ–621, Л., 1980, 20 с.; Алексеев В.Л., Леушкин Е.К., Молканов Л.И., Румянцев В.Л., Самсонов В.М. Повышение разрешающей способности фокусирующих кристалл-дифракционных гамма-спектрометров. Основные результаты научных исследований ЛИЯФ. 1981–1985 гг. Ленинград, 1986, с. 96.
13. Alexeev V.L., Leushkin E.K., Molkanov L.I., Romyantsev V.L. On the limit resolution of a curved-crystal γ -ray spectrometer. Capture γ -ray spectroscopy and related topics. Ed. S.Raman. Am. Inst. Phys. Conf. Proc. series, **125** (New-York, 1985), p. 916–917.
14. Алексеев В.Л., Румянцев В.Л., Дмитриев Р.П., Коваленко С.Н., Колыванова Н.Г., Турухано Б.Г., Турухано Н., Тюкавин В.А., Якутович В.Н. Интерферометр на голографических решетках для прецизионного γ -спектрометра ГСК-2. Изв. РАН. Сер. физ., 1996, **60**, № 11, с. 181–185.
15. Sumbaev O.I., Kaminker D.M., Smirnov A.I., Shaburov V.A. Program and theses of the XIII Annual Conference on Nuclear Spectroscopy (Moscow, Leningrad, 1963), p. 49.
16. Сумбаев О.И., Смирнов А.И., Алексеев В.Л., Каминкер Д.М., Шабуров В.А. Исследование возбуждённых состояний ^{104}Rh по γ -излучению из (n, γ)-реакций. Изв. АН СССР, 1965, **29**, с. 739–759.
17. Alexeyev V.L., Shaburov V.A., Kaminker D.M., Sumbaev O.I., Smirnov A.I. A double crystal diffraction spectrometer for studies of high energy gamma-ray resulting from thermal neutron capture. Nucl. Instr. Meth., 1968, **58**, p. 77–83.
18. Смирнов А.И., Шабуров В.А., Алексеев В.Л., Каминкер Д.М., Рылников А.С. Исследование γ -излучения из реакции $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ на кристалл-дифракционном спектрометре. Препринт ФТИ–124, Л., 1968, 10 с.; Изв. АН СССР. Сер. физ., 1969, **33**, с. 1270–1274.
19. Alexeev V.L., Emelianov B.A., Kabina L.P., Kaminker D.M., Khazov Yu.L., Kondurov I.A., Leushkin E.K., Loginov Yu.E., Rumiantsev V.L., Sakharov S.L., Smirnov A.I., Sushkov P.A. Low-Lying ^{134}Cs excited states from (n, γ) reaction. Nucl. Phys., 1975, **A248**, p. 249–275.
20. Alexeev V.L., Emelianov B.A., Kaminker D.M., Khazov Yu.L., Kondurov I.A., Loginov Yu.E., Rumiantsev V.L., Sakharov S.L., Smirnov A.I. The properties of ^{116}In excited states. Nucl. Phys., **A262**, 1976, p. 19–51.
21. Alexeev V.L., Emelianov B.A., Egorov A.I., Kabina L.P., Kaminker D.M., Khazov Yu.L., Kondurov I.A., Leushkin E.K., Loginov Yu.E., Martynov V.V., Ru-

- miantsev V.L., Sakharov S.L., Sushkov P.A., Borner H.G., Davidson W.F., Pinston J.A., Schreckenbach K. The level structure of ^{122}Sb . Nucl. Phys., 1978, **A297**, p. 373–411.
22. Sakharov S.L., Alexeev V.L., Kondurov I.A., Leushkin E.K., Loginov Yu.E., Martynov V.V., Rumiantsev V.L., Sushkov P.A., Khazov Yu.L., Hlawatsch G., von Egidy T., Lindner H. Low-lying ^{128}I excited states from (n, γ) reaction. Nucl. Phys., 1991, **A528**, p. 317–347.
 23. Алексеев В.Л., Румянцев В.Л. Измерение гамма-спектра активной зоны реактора с высоким (до 0,005%) разрешением. Изв. РАН. Сер. физ., 1996, **62**, № 11, с. 2100–2105.
 24. Alexeev V.L., Fedorov V.V., Rumiantsev V.L. Use of the crystal diffraction method to study the transmutation of long-lived nuclides. Preprint PNPI–2381, Gatchina, 2000, 8 p.
 25. Сумбаев О.И., Мезенцев А.Ф. Химический сдвиг рентгеновских линий К-серии олова. ЖЭТФ, 1965, **48**, № 2, с. 445–453.
 26. Сумбаев О.И., Мезенцев А.Ф., Марушенко В.И., Петрович Е.В., Рыльников А.С. Химический сдвиг экранирования внутренних уровней тяжелых элементов. ЖЭТФ, 1966, **50**, № 4, с. 861–869.
 27. Сумбаев О.И. Эффект химического смещения рентгеновских K_{α} -линий в тяжелых атомах. Систематика экспериментальных данных и сравнение с теорией. ЖЭТФ, 1969, **57**, № 11, с. 1716–1727.
 28. Сумбаев О.И., Мезенцев А.Ф. Экспериментальное обнаружение изотопического сдвига рентгеновской линии $K_{\alpha 1}$ молибдена. ЖЭТФ, 1965, **49**, № 2, с. 459–469.
 29. Мезенцев А.Ф., Сумбаев О.И., Марушенко В.И., Рыльников А.С., Иванов Г.А., Егоров А.И., Попова Г.Н. Изменения зарядовых радиусов ядер изотопов $^{124,126,128,130}\text{Te}$ по данным об изотопических смещениях рентгеновских K_{α} -линий. ЯФ, 1970, **11**, № 6, с. 1141–1145.
 30. Sumbaev O.I. Studies on the changes of nuclear charge radii using the effect of the X-ray line isotope shift. In *Nuclear Structure* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1968), p. 527–539.
 31. Рыльников А.С., Иванов Г.А., Марушенко В.И., Смирнов А.И., Сумбаев О.И. Изотопический эффект сверхтонкого уширения рентгеновских линий. Письма в ЖЭТФ, 1970, **12**, с. 128–131.
 32. Рыльников А.С., Егоров А.И., Иванов Г.А., Марушенко В.И., Мезенцев А.Ф., Смирнов А.И., Сумбаев О.И., Федоров В.В. Эффект сверхтонкого уширения рентгеновских линий. ЖЭТФ, 1972, **63**, с. 53–62.
 33. Сумбаев О.И., Смирнов Ю.П., Петрович Е.В., Зыков В.С., Грушко А.И. К экспериментальной проверке самосогласованного потенциала для 4f-электронов атомов редкоземельных элементов. Письма в ЖЭТФ, 1969, **10**, № 5, с. 209–213.
 34. Петрович Е.В., Смирнов Ю.П., Зыков В.С., Грушко А.И., Сумбаев О.И., Банд И.М., Тржасковская М.Б. Химические смещения $K_{\alpha 1,2^-}$, $K_{\beta 1,3^-}$, $K_{\beta 2,4^-}$

- линий тяжелых элементов, обусловленные s-, p-, d- или f-валентными электронами. ЖЭТФ, 1971, **61**, № 5 (11), с. 1756–1768.
35. Сумбаев О.И. Смещение рентгеновских К-линий при изменениях валентности в изоморфных фазовых переходах в редких землях. УФН, 1978, **124**, № 2, с. 281–306.
 36. Грушко А.И., Егоров А.И., Крутов Г.А., Мезенцева Т.Б., Петрович Е.В., Смирнов Ю.П., Сумбаев О.И. Валентные состояния редкоземельных элементов по данным о химических смещениях рентгеновских линий. Радиохимия, 1978, **20**, № 1, с. 128–135.
 37. Шабуров В.А., Банд И.М., Грушко А.И., Мезенцева Т.Б., Петрович Е.В., Смирнов Ю.П., Совестнов А.Е., Сумбаев О.И., Тржасковская М.Б., Маркова И.А. Исследование электронного механизма изоморфного фазового перехода в церии. ЖЭТФ, 1973, **65**, № 3, с. 1157–1173.
 38. Шабуров В.А., Совестнов А.Е., Егоров А.И., Крутов Г.А., Рыльников А.С., Сумбаев О.И. Исследование электронного механизма изоморфного фазового перехода в SmS. ЖЭТФ, 1975, **68**, № 1, с. 326–334.
 39. Шабуров В.А., Смирнов Ю.П., Совестнов А.Е., Тюнис А.В. Эффект группирования валентности церия в соединениях промежуточной валентности. Письма в ЖЭТФ, 1985, **41**, № 5, с. 213–215.
 40. Крутов Г.А., Совестнов А.Е., Шабуров В.А. Одновременный электронный переход $\text{Sm}^{2+} - \text{Sm}^{3+}$ и $\text{Yb}^{2+} - \text{Yb}^{3+}$ в $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$. ЖЭТФ, 1979, **76**, № 3, с. 1123–1127.
 41. Шабуров В.А., Совестнов А.Е., Смирнов Ю.П., Тюнис А.В., Синякова С.И. Двойной 4f-коллапс при изоморфном фазовом переходе $\text{Ce}_\gamma - \text{Ce}_\alpha$ в $\text{Ce}_{0.9-x}\text{R}_x\text{Th}_{0.1}$ (R=Eu, Yb). ЖЭТФ, 1994, **105**, № 2, с. 439–446.
 42. Тюнис А.В., Смирнов Ю.П., Совестнов А.Е., Шабуров В.А., Банд И.М., Тржасковская М.Б. Химическое смещение рентгеновских линий L-серии урана при удалении 5f-электрона («Факсимиле» 5f-электрона). ФТТ, 1994, **36**, № 9, с. 2729–2731.
 43. Совестнов А.Е., Смирнов Ю.П., Тюнис А.В., Шабуров В.А., Голубков А.В., Смирнов И.А. Обнаружение влияния запрета по четности на формирование состояния промежуточной валентности в $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$. ФТТ, 1997, **39**, № 6, с. 1017–1019.
 44. Тюнис А.В., Шабуров В.А., Смирнов Ю.П., Совестнов А.Е. Валентная нестабильность урана в $\text{U}(\text{Al}_{1-x}\text{Ge}_x)_3$. ФТТ, 1997, **39**, № 9, с. 1505–1508.
 45. Шабуров В.А., Совестнов А.Е., Смирнов Ю.П., Тюнис А.В., Друлис Х., Друлис М. Электронная структура Ce и Sm в гидридах и 4f-коллапс в YbN_x . ФТТ, 1998, **40**, № 8, с. 1393–1396.
 46. Смирнов Ю.П., Совестнов А.Е., Тюнис А.В., Шабуров В.А. Особенности электронной структуры церия и его 4d-, 5d-партнеров в фазах Лавеса CeM_2 (M = Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Os, Pt, Mg, Al). ФТТ, 1998, **40**, № 8, с. 1397–1411.

47. Шабуров В.А., Совестнов А.Е., Смирнов Ю.П., Тюнис А.В. Эволюция заполнения внешних валентных $6s$ -, $5d$ -оболочек в редкоземельных металлах. ФТТ, 1999, **41**, № 8, с. 1361–1362.
48. Егоров А.И., Родионов А.А., Рыльников А.С., Сумбаев О.И., Совестнов А.Е., Шабуров В.А. Эффект смещения рентгеновских линий, возбуждаемых при внутренней конверсии, обусловленной сверхтонким взаимодействием. Письма в ЖЭТФ, 1978, **27**, № 9, с. 514–517.
49. Грушко А.И., Кирьянов К.Е., Мифтахов Н.М., Рыльников А.С., Смирнов Ю.П., Федоров В.В. Эффект сверхтонкого смещения рентгеновских линий, возбуждаемых при внутренней конверсии. ЖЭТФ, 1981, **80**, с. 120–126.
50. Родионов А.А., Федоров В.В. Сверхтонкие смещения рентгеновских уровней, возбуждаемых при внутренней конверсии. ЖЭТФ, 1988, **94**, № 12, с. 114–124.
51. Fedorov V.V. and Rodionov A.A. Hyperfine displacement of atomic levels excited by internal conversion and the following X-ray cascade. Phys. Lett., 1989, **136A**, p. 306–311.
52. Fedorov V.V., Rodionov A.A., Band I.M., Trzhaskovskaya M.B. Hyperfine structure calculations for inner atomic levels. J. Phys. B, 1995, **28**, p. 1963–1973.
53. Федоров В.В., Рыльников А.С. О сверхтонкой структуре рентгеновских линий, сопровождающих К-захват. ЖЭТФ, 1979, **76**, с. 1986–1989.
54. Мифтахов Н.М., Родионов А.А., Смирнов Ю.П., Федоров В.В. Измерения магнитных моментов ядер по сверхтонким смещениям К-линий. Письма в ЖТФ, 1996, **22**, № 10, с. 50–55.
55. Sergeenkov J.V., Mazets E.P. Experience of a prism beta-spectrometer operation with a magnet from permalloy. Prism beta-spectrometers and their applications. Vilnius. Pyargale, 1971, p. 98.
56. Rodionov A.A. Hyperfine shift of K-conversion lines in decay of ^{169}Yb . Abstract booklet of 45-th Intern. Meet. on Nucl. Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure. St. Petersburg, 1995, p. 202.
57. Марушенко В.И., Мезенцев А.Ф., Петрунин А.А., Скорняков С.Г., Смирнов А.И. Новое измерение массы пи-минус мезона. Письма в ЖЭТФ, 1976, **23**, с. 80–82.
58. Марушенко В.И., Мезенцев А.Ф., Петрунин А.А., Скорняков С.Г., Смирнов А.И. Измерение энергий и ширин $3d$ - $2p$ -переходов в легких пимезоатомах. ЯФ, 1977, **26**, с. 685–687; Кирьянов К.Е., Марушенко В.И., Мезенцев А.Ф., Мохов Н.В., Петрунин А.А., Скорняков С.Г., Смирнов А.И., Суворов В.М. Труды конференции. Мезонная химия и мезомолекулярные процессы в веществе. Дубна, 1977, с. 166–170.
59. Beer W., Bos K., G. de Chambrier, Giovanetti K.L., Goudsmit P.F.A., Grigoryev B.V., Jeckelmann B., Knecht L., Kondurova L.N., Langhans J., Leisi H.J., Levchenko P.M., Marushenko V.I., Mezentsev A.F., Obermeier H., Petrunin A.A., Rohrer U., Sergeev A.G., Skornjakov S.G., Smirnov A.I., Steiner E., Strassner G., Suvorov V.M., Vacchi A. Crystal spectrometer for measurements of pionic X-rays. Nucl. Instr. and Meth., 1985, **A238**, p. 365–380.

60. G. de Chambrier, Beer W., F.W.N. de Boer, Bos K., Egorov A.I., Eckhause M., Giovanetti K.L., Gouldsmit P.F.A., Jeckelmann B., Kir'yanov K.E., Kondurova L.N., Lapina L.P., Leisi H.J., Marushenko V.I., Mezentsev A.F., Petrunin A.A., Sergeev A.G., Smirnov A.I., Strassner G., Suvorov V.M., Vacchi A., Wieser D. Precision measurement of the wavelengths and line widths of 3d-2p pionic X-ray transitions in low-Z atoms. *Nuclear Physics*, 1985, **A442**, p. 637–666.
61. Денисов А.С., Желамков А.В., Иванов Ю.М., Лапина Л.П., Левченко П.М., Малахов В.Д., Петрунин А.А., Сергеев А.Г., Смирнов А.И., Суворов В.М., Федин О.Л. Новое измерение массы К-минус-мезона. *Письма в ЖЭТФ*, 1991, **54**, с. 557–561.
62. Гурьев М.П., Денисов А.С., Желамков А.В., Иванов Ю.М., Левченко П.М., Малахов В.Д., Петрунин А.А., Платонов Ю.П., Сергеев А.Г., Смирнов А.И., Суворов В.М., Федин О.Л. Первое измерение рентгеновского излучения сигма-гиперонных атомов с помощью кристалл-дифракционного спектрометра. *Письма в ЖЭТФ*, 1993, **57**, с. 389–393.
63. Gavrikov Yu.A., Kiryanov K.E., Kravtsov A.V., Lapin O.E., Mezentsev A.F., Shablii A.I., Kravchuk L.V., Lobashev V.M., Vyalov G.N., Filatov Yu.V., Lukyanov D.P., Pavlov P.A. The program of experiments on investigation of mesic atoms on the Moscow meson factory with the help of a two flat crystal diffraction spectrometer. Preprint INR–1005/99, Moscow, 1999, 25 p.; Preprint PNPI–2367, Gatchina, 2000, 42 p.
64. Bournachev M.N., Filatov Yu.V., Kiryanov K.E., Loukianov D.P., Mezentsev A.F., Pavlov P.A. Precision angle measurements in a diffraction spectrometer by means of a ring laser. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**, p. 1067–1071.
65. Kiryanov K.E., Kondurova L.N., Marushenko V.I., Mezentsev A.F., Petrunin A.A., Skorniyakov S.G. Study of the pi-mesic atoms at the LNPI acselerator, using two crystal diffraction spectrometer. Preprint PNPI–1287, Gatchina, 1987, 21 p.
66. Федоров В.В., Кирьянов К.Е., Смирнов А.И. Возможность оптической модуляции электронного пучка при дифракции в кристалле. Программа Первой Республиканской конференции молодых физиков 6–9 декабря 1972 года. Ташкент, 1972, с. 12. О модуляции на оптических частотах электронов, дифрагирующих в кристалле. *ЖЭТФ*, 1973, **64**, № 4, с. 1452–1455.
67. Кирьянов К.Е., Федоров В.В. Об электромагнитном излучении частиц, дифрагирующих в монокристалле. Программа Первой Республиканской конференции молодых физиков 6–9 декабря 1972 года. Ташкент, 1972, с. 9.
68. Федоров В.В., Смирнов А.И. Особенности электромагнитного излучения электрона, дифрагирующего в монокристалле. Препринт ЛИЯФ–67, Ленинград, 1973, 16 с.; *ЖЭТФ*. 1974, **66**, № 2, с. 566–573.
69. Федоров В.В. О маятниковом излучении электрона при дифракции в монокристалле. *ЖЭТФ*, 1980, **78**, в. 1, с. 46–52.
70. Федоров В.В. Об излучении фотонов электронами при четырехволновой дифракции в монокристалле. *ЖЭТФ*, 1982, **82**, в. 2, с. 473–484.

71. Андреев В.А., Баублис В.В., Дамаскинский Е.А., Крившич А.Г., Кудин Л.Г., Марченков В.В., Морозов В.Ф., Нелюбин В.В., Орицин Е.М., Петров Г.Е., Рябов Г.А., Самсонов В.М., Самсонов Л.Э., Спириденков Э.М., Сулимов В.В., Сумбаев О.И., Щегельский В.А. Экспериментальное обнаружение эффекта объемного захвата в режим каналирования изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ, 1982, **36**, № 9, с. 340–343.
72. Сумбаев О.И. К теории объемного захвата протонов в режим каналирования изогнутыми монокристаллами. Препринт ЛИЯФ–1201, 1986, Л., 24 с.; ЖТФ, 1987, **57**, с. 2067–2077.
73. Sumbaev O.I. The theory of volume capture by a curved crystal in the channeling regime. In *Relativistic Channeling*, Ed. by Carrigan R.A., Ellison Jr., and J.A. (Plenum Press, 1987), p. 117–128.
74. Samsonov V.M. The Leningrad Experiment on Volume Capture. In *Relativistic Channeling*, Ed. by Carrigan R.A., Ellison Jr., and J.A. (Plenum Press, 1987), p. 129–162. (см. также докт. дисс.).
75. Андреев В.А., Баублис В.В., Дамаскинский Е.А., Крившич А.Г., Кудин Л.Г., Марченков В.В., Морозов В.Ф., Нелюбин В.В., Орицин Е.М., Петров Г.Е., Рябов Г.А., Самсонов В.М., Самсонов Л.Э., Спириденков Э.М., Сулимов В.В., Сумбаев О.И., Щегельский В.А. Фокусировка пучка 1 ГэВ-ных протонов при объемном захвате в режим каналирования изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ, 1984, **39**, № 2, с. 58–61.
76. Андреев В.А., Баублис В.В., Бондарь Н.Ф., Гаврилов Г.Е., Комков Б.Г., Коптев В.П., Крившич А.Г., Кудин Л.Г., Мартюшов А.М., Марченков В.В., Морозов В.Ф., Мыльников В.А., Нелюбин В.В., Орицин Е.М., Рябов Г.А., Самсонов В.М., Самсонов Л.Э., Спириденков Э.М., Сулимов В.В., Сумбаев О.И., Фотиева Е.Н., Щегельский В.А. Пространственная фокусировка пучка 1 ГэВ-ных протонов изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ, 1985, **41**, с. 408.
77. Chen D., Albuquerque I.F., Baublis V.V., Bondar V.V., Carrigan R.A., Cooper P.S., Lisheng Dai, Denisov A.S., Dobrovolsky A.V., Dubbs T., Endler A.M.F., Escobar C.O., Foucher M., Golovtsov V.L., Gorichev P.A., Gottschalk H., Gouffon P., Grachev V.T., Khanzadeev A.V., Kubantsev M.A., Kuropatkin N.P., Lach J., Pengfei Lang, Lebedenko V.N., Li Chengze, Li Yunshan, Mahon J.R.P., McCliment E., Morelos A., Newsom C., Pommot Maia M.C., Samsonov V.M., Schegelsky V.A., Shi Huanzhang, Smith V.J., Sun C.R., Tang Fukun, Terentyev N.K., Timm S., Tkatch I.I., Uvarov L.N., Vorobyov A.A., Yang Lie, Zhao Wenheng, Zheng Shuchen, Zhong Yuanyuan. First Observation of Magnetic Moment Precession of Channeled Particles in Bent Crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**, № 23, p. 3286–3289.
78. Denisov A.S., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Platonov Yu.P., Schetkovsky A.I., Skorobogatov V.V., Smirnov A.I., Baranov V.I., Chesnokov Yu.A., Dudenko V.V., Galyaev N.A., Kotov V.I., Tsarik S.V., Zapol'sky V.N. First results from a study of a 70 GeV proton beam being focused by a bent crystal. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1992, **B69**, p. 382–384.

79. Baranov V.I., Biryukov V.M., Bugorrsky A.P., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I., Tarakanov M.V., Terekhov V.I., Tsarik S.V., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Platonov Yu. P., Smirnov A.I. Highly efficient deflection of a divergent beam by a bent single crystal. Nucl. Instr. and Meth., 1995, **B95**, p. 449–451.
80. Fedin O.L., Kiselev O.A., Lapina L.P., Levchenko P.M., Markov A.A., Prokofev O.E., Skorobogatov V.V., Smirnov A.I., Suvorov V.M., Vorobyev A.A., Vorobyev An.A. The First Result on X-ray Test Station for Cathode Strip Muon Chambers. GEM TN-93-351.
81. Ivanov Yu., Fedin O., Jelamkov A., Muraviev S., Platonov Yu., Smirnov A. An X-ray measurement station for ATLAS endcap TRT calibration. Part 1. Design, adjustment and testing. Preprint PNPI-2162, Gatchina, 1997, 33 p.; Part 2. Results from the measurements of the full-scale endcap TRT wheel prototype. Preprint PNPI-2163, Gatchina, 1997, 45 p.
82. Сумбаев О.И. Интерференционные эффекты от гравитации, градиента магнитного поля или вращения Земли при дифракции нейтронов на упруго изогнутом монокристалле. Препринт ЛИЯФ-676, Л., 1981. 13 с.
83. Алексеев В.Л., Лапин Е.Г., Леушкин Е.К., Румянцев В.Л., Сумбаев О.И., Федоров В.В. Гравитационный эффект при дифракции нейтронов на изогнутом кварцевом монокристалле. ЖЭТФ, 1988, **94**, с. 371–383.
84. Alexeev V.L., Fedorov V.V., Lapin E.G., Leushkin E.K., Rumiantsev V.L., Sumbaev O.I., and Voronin V.V. Observation of a strong interplanar electric field in a dynamical diffraction of a polarized neutron. Nucl. Instr. and Meth., 1989, **A284**, p. 181–183.
85. Алексеев В.Л., Воронин В.В., Лапин Е.Г., Леушкин Е.К., Румянцев В.Л., Сумбаев О.И., Федоров В.В. Измерение сильного электрического внутрикристаллического поля в швингеровском взаимодействии дифрагирующих нейтронов. ЖЭТФ, 1989, **96**, с. 1921–1926.
86. Федоров В.В., Алексеев В.Л., Воронин В.В., Лапин Е.Г., Румянцев В.Л. Влияние ориентации спина нейтрона на маятниковую картину при дифракции в кристалле без центра симметрии. Препринт ЛИЯФ-1608, Л., 1990, 12 с.; Письма в ЖТФ, 1995, **21**, с. 44–49.
87. Fedorov V.V., Voronin V.V., and Lapin E.G. On the search for neutron EDM using Laue diffraction by a crystal without a centre of symmetry. Preprint LNPI-1644, 1990, L., 36 p.; J. Phys. G., 1992, **18**, p. 1133–1148; Федоров В.В. О возможности поиска ЭДМ нейтрона при дифракции в нецентросимметричном кристалле. Материалы XXVI Зимней школы ЛИЯФ (ФЭЧ). Л., 1991, ч. 1, с. 65–118.
88. Федоров В.В., Воронин В.В., Лапин Е.Г., Сумбаев О.И. О возможности поиска ЭДМ нейтрона по деполяризации при дифракции в кристалле без центра симметрии. Письма в ЖТФ. 1995, **21**, с. 50–55; Федоров В.В., Воронин В.В. Новые возможности поиска ЭДМ нейтрона поляризационным методом при дифракции в кристалле без центра симметрии. Физика атомного

- ядра и элементарных частиц (Материалы Юбилейной XXX Зимней школы ПИЯФ, ч. 1). СПб., 1996, с. 123–164.
89. Fedorov V.V., Voronin V.V., Lapin E.G., Sumbaev O.I. New possibilities for neutron EDM search using diffraction by crystal without a centre of symmetry. *Physica B*, 1997, **234–236**, p. 8–9.
 90. Воронин В.В., Лапин Е.Г., Семенихин С.Ю., Федоров В.В. Прямое измерение времени задержки нейтрона в кристалле при дифракции по Лауэ. Препринт ПИЯФ–2337, Гатчина, 1999, 12 с.; Письма в ЖЭТФ, 2000, **71**, в. 2, с. 110–115.
 91. Воронин В.В., Лапин Е.Г., Семенихин С.Ю., Федоров В.В. Обнаружение эффекта деполяризации нейтронного пучка при дифракции по Лауэ в нецентросимметричном кристалле. Письма в ЖЭТФ, 2000, **72**, в. 6, с. 445–450.
 92. Fedorov V.V., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Set-up for searching a neutron EDM by the crystal-diffraction method: first measurements. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2001, **297**, № 1–4, p. 293–298.
 93. Fedorov V.V., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. First observation of new effects at the set-up for searching for a neutron electric dipole moment by a crystal-diffraction method. *Appl. Phys.*, 2002, **A74**, [Suppl. 1], p. s298–s301.
 94. Fedorov V.V., Voronin V.V. Diffraction and neutron optics in noncentrosymmetric crystals. New feasibility of a search for neutron EDM. Материалы XXXV Зимней школы ПИЯФ. СПб, 2001, с. 90–113.
 95. Воронин В.В., Лапин Е.Г., Семенихин С.Ю., Федоров В.В. Вращение спина нейтрона при прохождении через нецентросимметричный монокристалл. Письма в ЖЭТФ, 2001, **74**, вып. 5, с. 279–282.
 96. Fedorov V.V., Lapin E.G., Semenikhin S.Y., Voronin V.V. The effect of cold neutron spin rotation at passage through a noncentrosymmetric crystal. *Appl. Phys.*, 2002, **A74**, [Suppl. 1], p. s91–s93.
 97. Fedorov V.V., Voronin V.V. Neutron diffraction and optics in noncentrosymmetric crystals. New feasibility of a search for neutron EDM. *Nucl. Instr. and Meth.*, 2003, **B 201**, № 1, p. 230–242.
 98. Voronin V.V., Fedorov V.V., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu. Laue diffraction method of a neutron EDM search. Project of the experiment, *Physica B: Condensed Matter*, 2003, **335**(1–4), p. 201–204.
 99. Fedorov V.V., Lapin E.G., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V.V., Petoukhov A.K., Semenikhin S.Yu., Soldner T., Tasset F., Voronin V.V. The Laue diffraction method of a search for neutron EDM. Experimental test of the sensitivity. *Nucl. Instr. and Meth.*, 2004, **227B**, № 1–2, p. 11–15.
 100. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Redoubled effect of a neutron spin rotation in deformed noncentrosymmetric crystal for the Bragg diffraction scheme. Письма в ЖЭТФ, 2004, **80**, № 9, p. 675–679.

Публикации лаборатории за последние 5 лет

1. Fedorov V.V., Lapin E.G., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V.V., Petoukhov A.K., Semenikhin S.Yu., Soldner T., Tasset F., Voronin V.V. The Laue diffraction method of a search for neutron EDM. Experimental test of the sensitivity. Nucl. Instr. and Meth., 2005, **V 227**, № 1–2, p. 11–15.
2. Алексеев В.Л., Румянцев В.Л., Федоров В.В. Измерение гамма-спектра активной зоны реактора на кристалл-дифракционном гамма-спектрометре ГСК-2М. Препринт ПИЯФ–2605, Гатчина, 2005, 35 с.
3. Петрунин А.А., Совестнов А.Е., Тюнис А.В., Федоров В.В., Фомин Э.В. Кристалл-дифракционный спектрометр для изучения эффекта химического смещения рентгеновских линий в области «мягких» энергий (4÷8 кэВ). Препринт ПИЯФ–2646, Гатчина, 2005, 12 с.
4. Fedorov V.V., Voronin V.V. Neutron Diffraction and Optics of a Noncentrosymmetric Crystal. New Feasibility of a Search for Neutron EDM. <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0504042>, 2005, 34 p.
5. Fedorov V.V., Lapin E.G., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V., Petoukhov A., Semenikhin S.Yu., Soldner T., Tasset F., Voronin V.V. Test experiment to search for a neutron EDM by the Laue diffraction method. <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0512064>, 2005, 12 p.
6. Fedorov V.V., Lapin E.G., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V., Petoukhov A., Semenikhin S.Yu., Soldner T., Tasset F., Voronin V.V. First Observation of the Neutron Spin Rotation for Laue Diffraction in a Deformed Non-Centrosymmetric Crystal. Preprint PNPI–2677, Gatchina, 2006, 15 p.
7. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Neutron spin optics in noncentrosymmetric crystals as a new way for nEDM search. Nucl. Instr. and Meth., 2006, **B 252**, № 1, p. 131–135.
8. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Neutron spin optics in a noncentrosymmetric crystals as a way for nEDM search. New experimental results. Physica B, 2006, **385–386**, p. 1216–1218.
9. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Neutron Laue diffraction in a weakly deformed crystal at the Bragg angles close to $\pi/2$. Preprint PNPI–2698, Gatchina, 2006, 12 p.
10. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Neutron Laue diffraction in a weakly deformed crystal at the Bragg angles close to $\pi/2$. Письма в ЖЭТФ, 2007, **85**, вып. 1, p. 96–99.
11. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Crystal diffraction method to measure neutron electric charge and inertial to gravitational mass ratio. Preprint PNPI–2747, Gatchina, 2007, 16 p.
12. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V., Braginetz Yu.P., Amosov K.Yu. Neutron volumetric analysis of a high perfect crystal quality. Preprint PNPI–2748, Gatchina, 2007, 11 p.
13. Fedorov V.V., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V., Petoukhov A., Soldner T., Tasset F. First observation of the

- neutron spin rotation for Laue diffraction in a deformed non-centrosymmetric crystal. *International Journal of Modern Physics A (IJMPA)*, 2008, **23**, iss. 9, p. 1435–1445.
14. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V., Braginetz Yu.P., Amosov K.Yu. Neutron volumetric test of interplanar distances of highly perfect crystals. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, 2008, **A 593**, p. 472–474.
 15. Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V. Diffraction enhancement and new way to measure neutron electric charge and the ratio of inertial to gravitational mass. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, 2008, **A 593**, p. 505–509.
 16. Воронин В.В., Кузнецов И.А., Лапин Е.Г., Семенихин С.Ю., Федоров В.В. Эффект дифракционного усиления и новые возможности измерения заряда нейтрона и отношения его инертной массы к гравитационной. *Ядерная физика*, 2009, **72**, № 2, с. 1–7.
 17. Воронин В.В., Кузнецов И.А., Федоров В.В. Neutron diffraction constraint on spin-dependent short range interaction. *Письма в ЖЭТФ*, 2009, **90**, вып. 1, с. 7–9.
 18. Fedorov V.V., Jentschel M., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Leli'evre-Berna E., Nesvizhevsky V., Petoukhov A., Semenikhin S.Yu., Soldner T., Voronin V.V., Braginetz Yu.P. Perspectives for nEDM Search by Crystal Diffraction. *Test Experiment and Results. Nuclear Physics*, 2009, **A 827**, p. 538–540.
 19. Лапин Е.Г. Эффект памяти пьезоэлектрической деформации в монокристаллах кварца. *Письма в ЖТФ*, 2009, **35**, вып. 5, с. 1–7.
 20. Совестнов А.Е., Тюнис А.В., Фомин Э.В., Петрунин А.А., Курбаков А.И., Мелех Б.Т. Исследование электронной структуры катионов Mn, Sr, La, Ce и Sm в манганитах $\text{Ln}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (Ln=La, Ce, Sm) методом смещений рентгеновских линий. *Письма в ЖТФ*, 2009, **35**, вып. 1., с. 55–62.
 21. Петрунин А.А., Совестнов А.Е., Тюнис А.В., Фомин Э.В. Кристалл-дифракционный спектрометр для изучения электронной структуры элементов методом смещения рентгеновских линий в области «мягких» энергий (5–15 кэВ). *Письма в ЖТФ*, 2009, **35**, вып. 2, с. 42–48.

Обзоры и монографии

1. Сумбаев О.И. *Кристалл-дифракционные гамма-спектрометры*. М.: Госатомиздат, 1963.
2. Sumbaev O.I. Studies on the changes of nuclear charge radii, using the effect of X-ray line isotope shift. In *Nuclear Structure*. International atomic energy Agency, Vienna, 1968, p. 527–539.
3. Sumbaev O.I. Chemical and isotope shifts and hyperfine broadening of X-ray lines. *Proceedings of the International Conference on Inner Shell Ionization Phenomena and Future Applications*. April 17–22, 1972. Ed. by Fink R.W., Manson S.T., Palms J.M., Venugopala Rao P. Jan., 1973.

4. Sumbaev O.I. Chemical effects in X-ray spectroscopy. In *Modern physics in chemistry*. Ed. by Fluck and Goldanskii V.I. Academic Press, 1976, **1**, p. 31–51.
5. Сумбаев О.И. Смещение рентгеновских К-линий при изменениях валентности и изоморфных фазовых переходах в редких землях. УФН, 1978, **124**, № 2, с. 281–306.
6. Грушко А.И., Егоров А.И., Крутов Г.А., Мезенцева Т.Б., Петрович Е.В., Смирнов Ю.П., Сумбаев О.И. Валентные состояния редкоземельных элементов по данным о химических смещениях рентгеновских линий. Радиохимия, 1978, **20**, № 1, с. 128–135.
7. Sumbaev O.I. The Theory of volume capture by a curved crystal in the channeling regime. In *Relativistic channeling*. Ed. by R.A. Carrigan, Jr., and J.A. Ellison. Plenum Press, 1987, p. 117–128.
8. Samsonov V.M. The Leningrad experiment on volume capture. In *Relativistic channeling*. Ed. by R.A. Carrigan, Jr. and J.A. Ellison. Plenum Press, 1987, p. 129–162.
9. Федоров В.В. О возможности поиска ЭДМ нейтрона при дифракции в нецентросимметричном кристалле. Материалы XXVI Зимней школы ЛИЯФ (ФЭЧ). Л., 1991. ч. 1, с. 65–118.
10. Федоров В.В., Воронин В.В. Новые возможности поиска ЭДМ нейтрона поляризационным методом при дифракции в кристалле без центра симметрии. Физика атомного ядра и элементарных частиц (Материалы Юбилейной XXX Зимней школы ПИЯФ). СПб., 1996, ч. 1, с. 123–164.
11. Федоров В.В. Электрический дипольный момент нейтрона: новые возможности поиска. Природа, 1999, **6**, с. 74–83.
12. Fedorov V.V., Voronin V.V. Diffraction and neutron optics in noncentrosymmetric crystals. New feasibility of a search for neutron EDM. Материалы XXXV Зимней школы ПИЯФ. СПб., 2001, с. 90–113.
13. Fedorov V.V. Interactions of particles and gamma-radiation with crystals and application of the crystal-diffraction methods in physics. PNPI XXX – Scientific activity at the last third of the 20th Century. Neutron research department. Gatchina, 2001, p. 73–100.
14. Алферов Ж.И., Варшалович Д.А., Воробьев А.А., Коноплев К.А., Лобашев В.М., Мазец Е.П., Назаренко В.А., Петров Г.А., Петров Ю.В., Серебров А.П., Скринский А.Н., Федоров В.В. Памяти Олега Игоревича Сумбаева. УФН, 2003, **173**, в. 9, с. 1023–1024.
15. Fedorov V.V., Voronin V.V. Neutron diffraction and optics in noncentrosymmetric crystals. New feasibility of a search for neutron EDM. Nucl. Instr. and Meth., 2003, **B201**, № 1, p. 230–242.
16. Федоров В.В., Воронин В.В. Динамическая дифракция и оптика нейтронов в нецентросимметричных кристаллах. Поиск ЭДМ нейтрона: новые возможности. Учебное пособие. СПб.: Изд-во ПИЯФ, 2004, 118 с.
17. Fedorov V.V. Crystal-diffraction methods in physics. Материалы XXXVII и XXXVIII Зимних школ ПИЯФ. СПб., 2004, с. 5–53.

18. Федоров В.В. Нейтронная физика. Учебное пособие. СПб.: Изд-во ПИЯФ, 2004, 334 с.
19. Федоров В.В. Симметрии, законы сохранения и слабые взаимодействия. Материалы XXXVIII–XXXIX Зимних школ ПИЯФ (физика и техника реакторов). СПб., 2006, с. 149–224.
20. Voronin V.V., Fedorov V.V. Neutron Diffraction and Optics of a Non-centrosymmetric Crystal. New Feasibility of a Search for Neutron EDM. *Frontiers in Condensed Matter Physics Research*. Nova Science, NY, 2006, p. 13–39.

Признание научных результатов

Приоритет научных результатов школы О.И. Сумбаева признан во всем мире.

Например, в Калифорнийском технологическом институте (США) были построены кристалл-дифракционные спектрометры, в которых использованы как результаты по выбору кристаллографических плоскостей, так и по ориентации выреза пластин кристаллов. На этих спектрометрах проводились измерения химических и изотопических смещений рентгеновских линий методом, разработанным О.И. Сумбаевым и впервые примененным в нашей лаборатории. Тем же методом в ЦЕРНе на аналогичном гамма-спектрометре были измерены сверхтонкие смещения рентгеновских линий, возбужденных К-захватом. Для исследования подобных процессов кристалл-дифракционные спектрометры были построены также в Юлихе (Германия), где тоже использовались результаты, полученные в лаборатории.

Был спроектирован спектрометр для химического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, где он был построен и использовался для измерений химических и изотопических смещений рентгеновских линий К- и L-серии.

Несколько кристалл-дифракционных спектрометров для исследования адронных атомов было создано в Гатчине. Один из них был установлен на ускорителе ПИЯФ для измерения массы π -мезона, после модернизации он был перемещен на Серпуховский ускоритель в ИФВЭ и использовался там для измерений масс K^- -мезона и Σ^- -гиперона.

Второй спектрометр был сконструирован, построен и установлен на мезонной фабрике в PSI (Швейцария), где были исследованы π -мезонные атомы методом, предложенным А.И. Смирновым с использованием «гатчинской мишени».

Создание мезон-рождающей мишени путем помещения образца в прямой пучок ускорителя дало возможность на несколько порядков увеличить выход экзотических атомов и провести развернутые исследования их спектров, раньше такое не представлялось возможным. Поэтому мишень получила мировое признание как «гатчинская мишень».

Установка для каналирования использовалась в эксперименте по измерению магнитного момента Σ^+ -гиперона во FNAL (США).

Исследования фокусировки пучков заряженных частиц при каналировании в монокристаллах вызвали широкий резонанс в мире и были продолжены в ИФВЭ (Серпухов), FNAL (США) и CERN (Швейцария).

Для эксперимента ATLAS в ЦЕРНе была построена рентгеновская измерительная станция для калибровки позиций проволок в тонких пропорциональных камерах в виде трубок, которые являются основными структурными элементами торцевого детектора переходного излучения ATLAS.

В ИЛЛ (Франция) совместно с зарубежными коллегами мы продолжили эксперименты по дифракции нейтронов в нецентросимметричных кристаллах на спроектированной нами установке с использованием специальных ориентаций и вырезов кристаллов. В настоящее время после проведения ряда тестовых экспериментов готовится новый полномасштабный эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона дифракционным методом.

Развитие нового типа прецизионной двухкристальной спектрометрии, основанной на возможности плавно менять параметр решетки реперного кристалла, используя тепловое расширение, и тем самым выделять нейтроны в узком интервале энергий (в пределах брэгговской ширины), позволило, с одной стороны, разработать новый метод поиска ЭДМ нейтрона, с другой стороны, получить высокоточный метод тестирования объемного совершенства кристаллов.

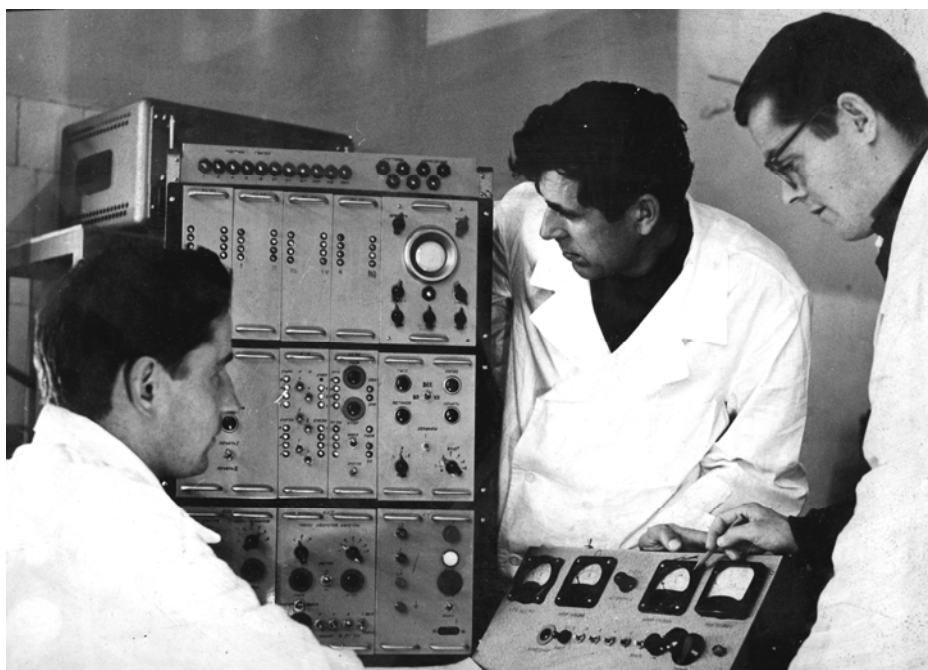
Ввод в строй реактора ПИК в ближайшие годы даст нам возможность и перспективу не только получить новые результаты, но и остаться лидерами в направлениях, связанных с использованием дифракции в фундаментальных физических исследованиях.

Фотогалерея



Лаборатория рентгеновской и гамма-спектроскопии (Июль, 2001).
Сверху. Стоят (слева направо): Ю.П. Смирнов, В.А. Шабуров, А.Е. Совестьнов.
Сидят: В.В. Федоров, О.И. Сумбаев, А.В. Тюнис

Внизу. Стоят: В.Л. Румянцев, Е.Г. Лапин, В.Л. Алексеев, В.В. Воронин, С.Ю. Семенихин.
Сидят: А.В. Тюнис, Е.Г. Андреев, П.Л. Соколова, К.Е. Кирьянов



М.В. Федотов, Е.В. Петрович и Ю.П. Смирнов
около многоканальной счетной системы (МСС-8)



А.Е. Совестнов. Работа на дифрактометре ДРОН-2.0



Лаборатория в 1979 г. 20 лет со дня пуска реактора ВВР-М.
Нижний ряд (слева направо): А. Тюнис, В. Алексеев, О. Сумбаев, Н. Смирнова.
Верхний ряд: Г. Солодов, Ю. Васильев, Ю. Смирнов, Ю. Грушко, В. Шабуров,
 Л. Самсонов, В. Румянцев, А. Совестьнов, М. Федотов, Е. Леушкин,
 Н. Мифтахов, В. Пивоваров, В. Самсонов и Л. Молканов



В.Л. Румянцев за обработкой экспериментальных данных, полученных на ГСК-2



В.А. Шабуров за работой на спектрометре ГСК-4, который используется для исследования фазовых переходов



В.В. Федоров. Лекция в Зимней школе физики



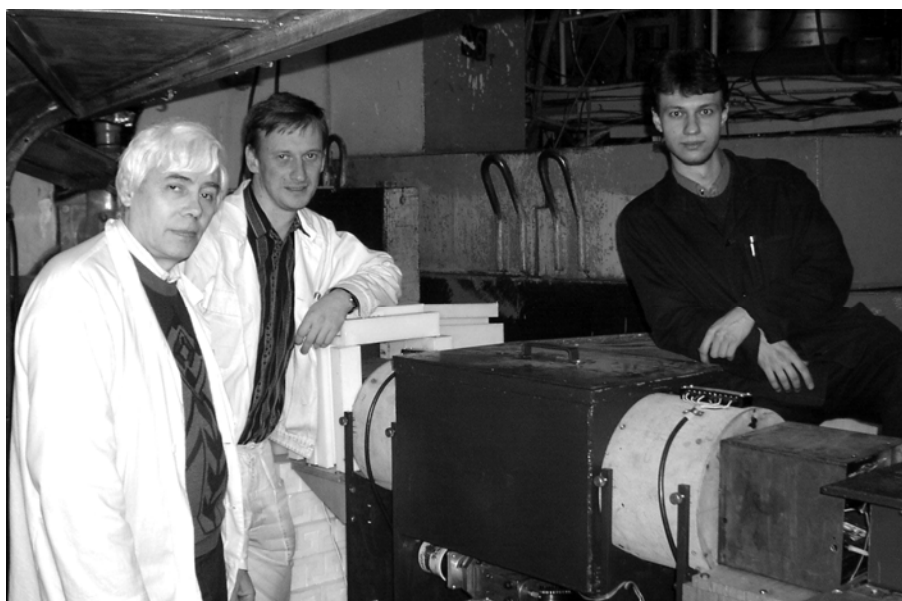
О.И. Сумбаев.
Речь на ученом совете ПИЯФ



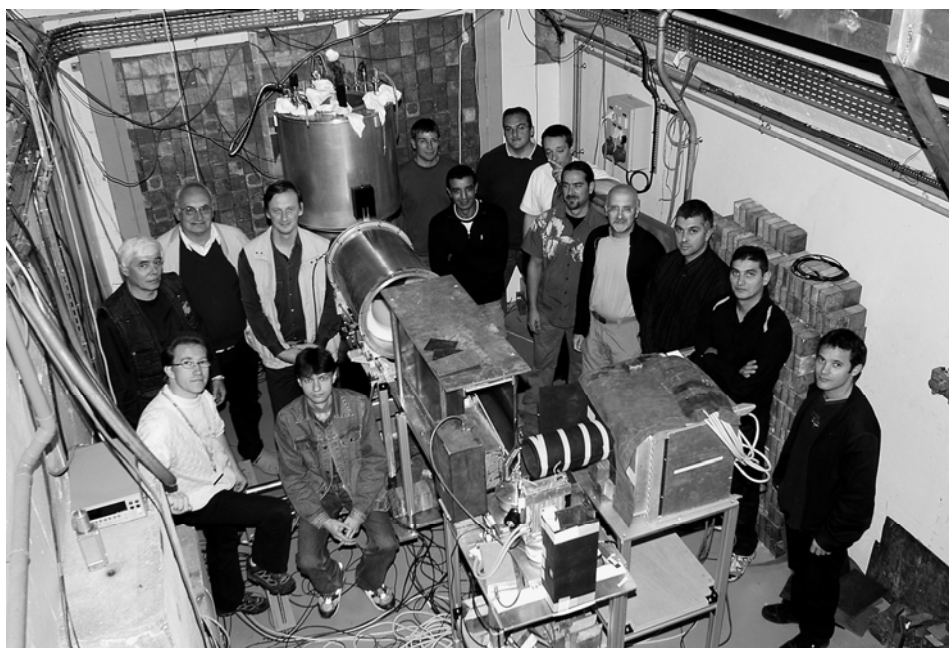
Е.Г. Лапин за установкой ДЭДМ. На переднем плане большой кварцевый кристалл, в котором напряженность электрического поля, действующего на нейтрон, достигает 200 тысяч киловольт на см



А.В. Тюнис за ГСК-1, который используется для изучения рентгеновских линий L-серии актинидов



Установка ДЭДМ на пучке реактора ВВР-М.
Слева направо: В.В. Федоров, В.В. Воронин и С.Ю. Семенихин



Тестовая установка ДЭДМ на пучке высокопоточного реактора
Института Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция), 2006 г.



Лаборатория в конце 2007 г.

А.В. Тюнис, С.Ю. Семенихин, К.Ю. Амосов, Э.В. Фомин, Ю.П. Брагинец,
В.В. Воронин, И.А. Кузнецов, В.В. Федоров, Е.Г. Лапин, В.Л. Румянцев, А.А. Петрунин