

Применение рассеяния
нейтронов для решения
структурных и
материаловедческих задач
(нейтронография)

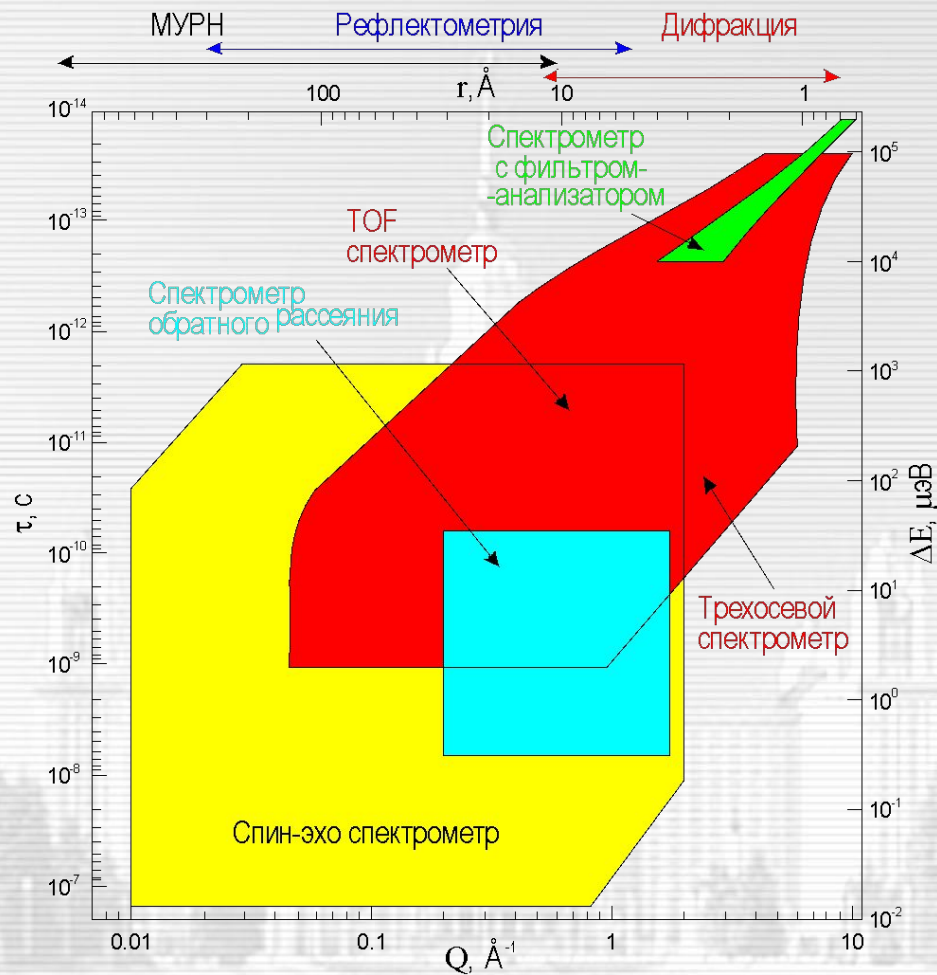


Рис. 1-1. Диаграмма, иллюстрирующая доступные для различных нейтронных спектрометров области на плоскости переданный импульс – переданная энергия. Переданный импульс (в \AA^{-1}) указан на нижней шкале, соответствующие ему характерные расстояния (в \AA) – на верхней шкале. Там же указаны интервалы характерных расстояний, доступных для дифракции, рефлектометрии и малоуглового рассеяния нейтронов. По правой и левой шкалам отложены переданные энергии (в μeV) и соответствующие им характерные времена процессов (в секундах).

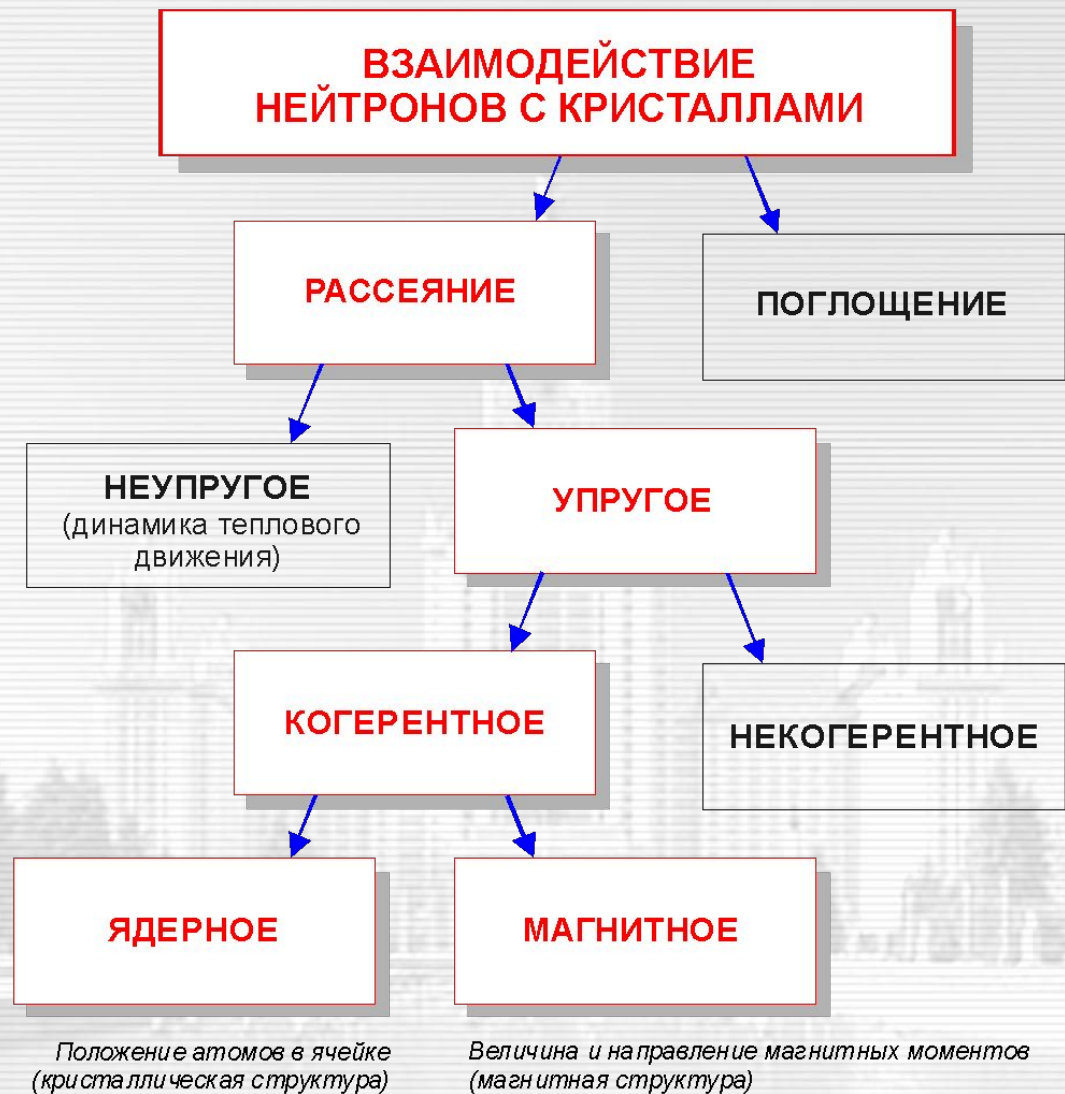


Рис. 1-2. Основные типы взаимодействия тепловых нейтронов с веществом. Для получения информации об атомной структуре кристалла следует использовать ядерное, когерентное, упругое рассеяние нейтронов. Для получения информации о магнитной структуре кристалла следует использовать магнитное, когерентное, упругое рассеяние нейтронов.

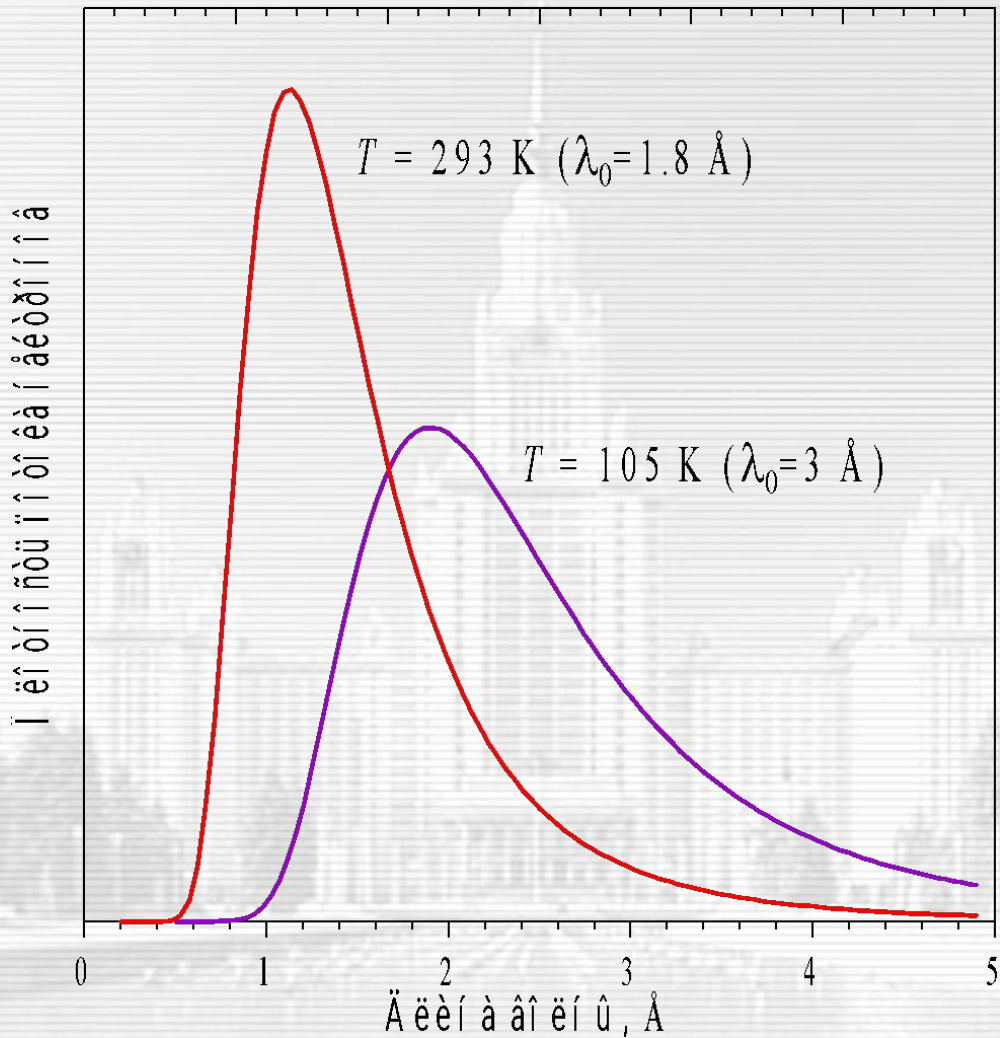


Рис. 2-1. Спектральное распределение плотности нейтронного потока для разных температур замедлителя, представленное в шкале длин волн. λ_0 – характерная длина волны максвелловского распределения.

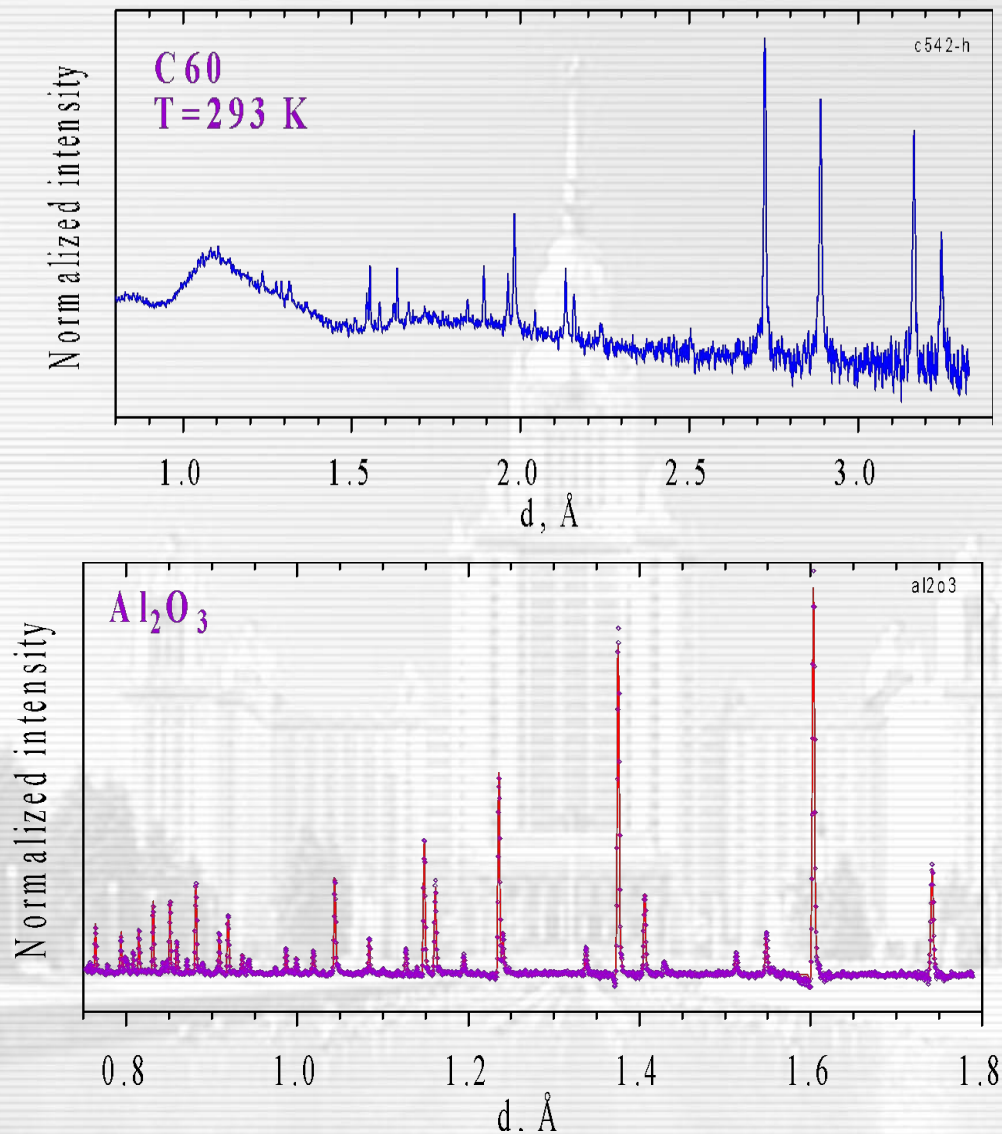


Рис. 3-1. Сравнение нейтронных дифракционных спектров, измеренных от “хорошего” (Al_2O_3 , внизу) и “плохого” (фуллерен C_{60} , вверху) кристаллов. В структуре C_{60} степень дальнего порядка понижена, что проявляется в уменьшении интенсивности пиков при малых d и большом диффузном фоне.

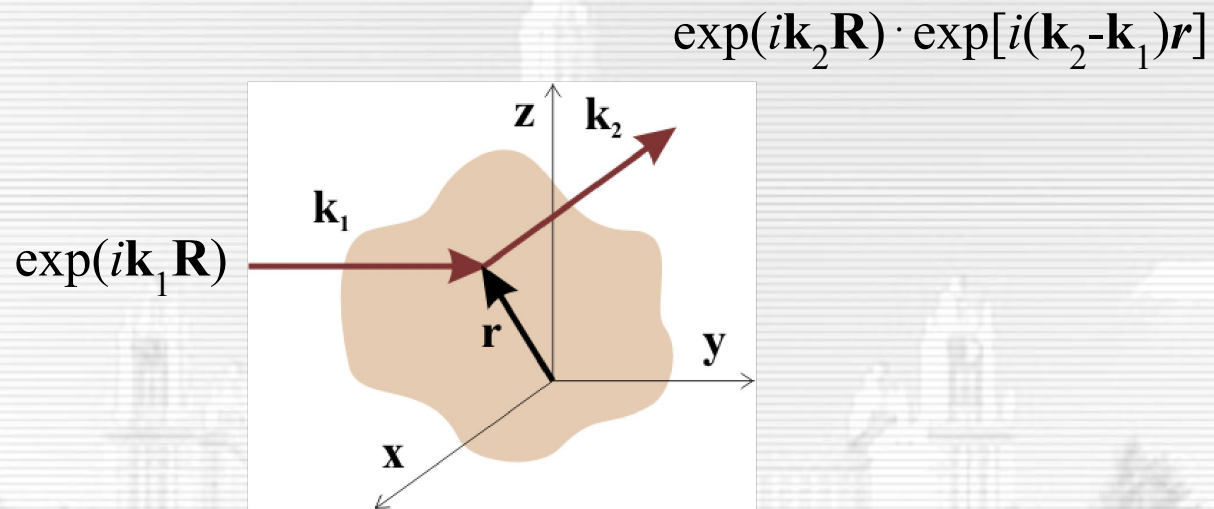


Рис. 3-2. Схема рассеяния волны в точке, не совпадающей с началом координат. В амплитуде рассеянной волны при этом появляется фактор $\exp[i(\mathbf{k}_2-\mathbf{k}_1)\mathbf{r}]$, связанный с дополнительной разницей фаз.

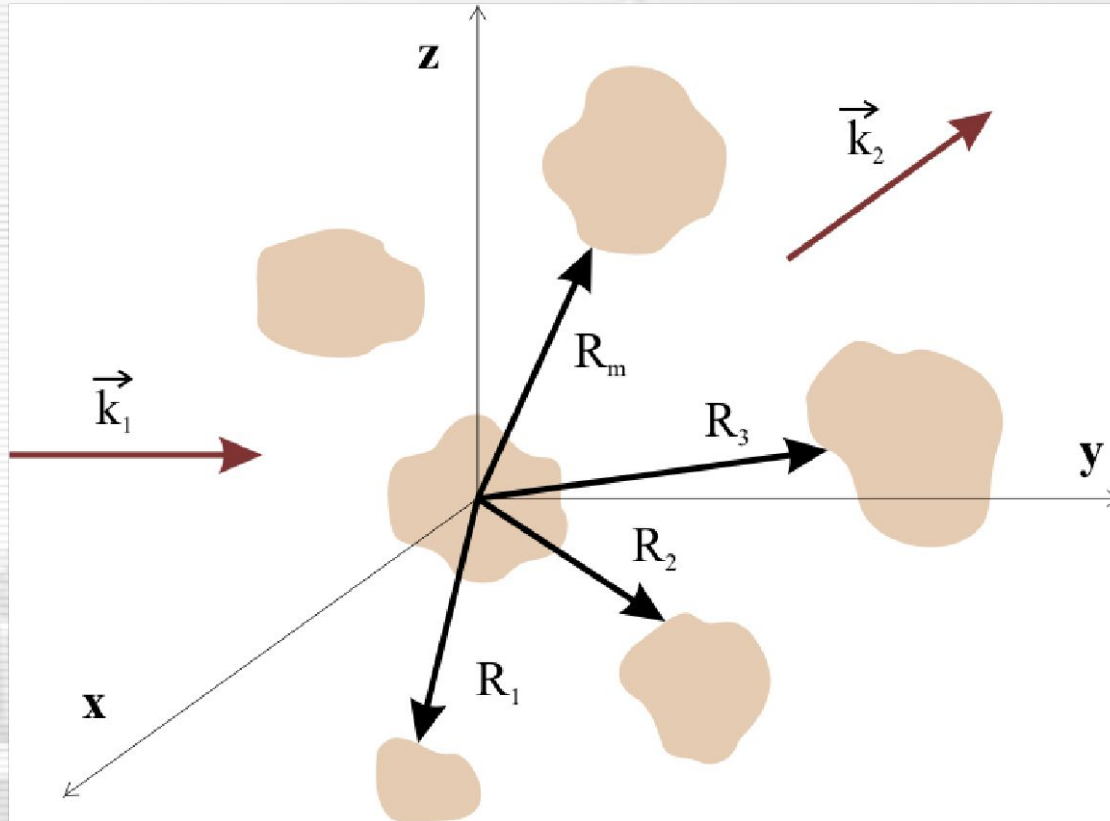


Рис. 3-3. Схема рассеяния волны на совокупности объектов, положения которых в общей системе координат фиксируются векторами \mathbf{R}_m .

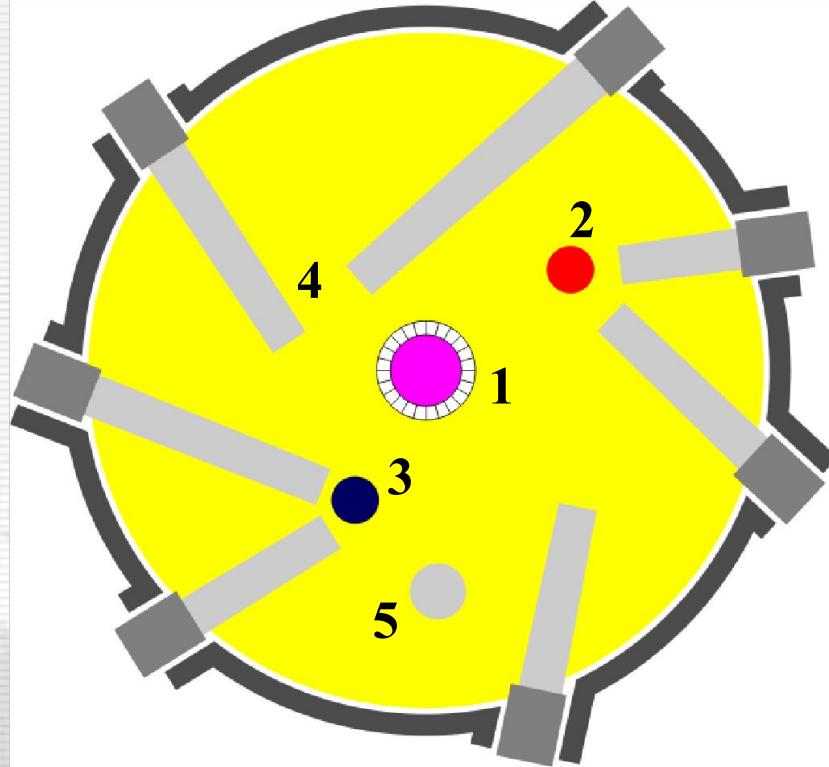


Рис. 4-1. Схема центральной части стационарного исследовательского нейтронного реактора. Обозначены: 1 - активная зона, 2 - горячий источник, 3 - холодный источник. Показаны выходы горизонтальных каналов (4) и один из вертикальных каналов (5).

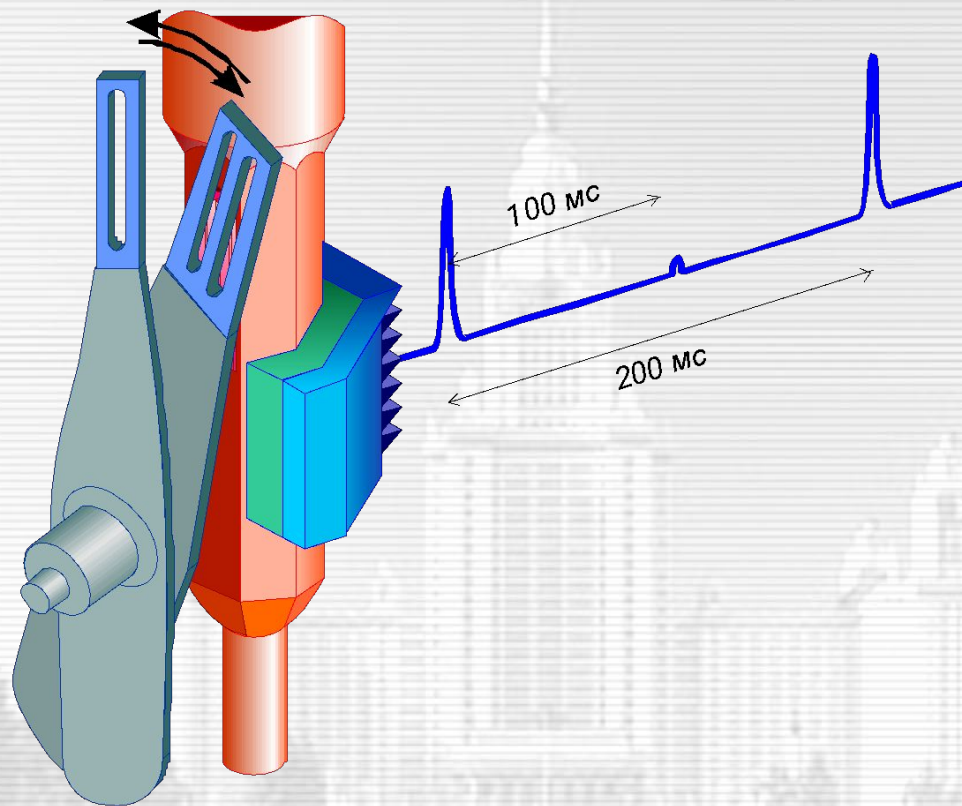


Рис. 4-2. Схема образования нейтронных импульсов на реакторе ИБР-2. Рядом с активной зоной вращаются лопасти подвижного отражателя, навстречу друг другу с частотой 5 Гц (вспомогательный ротор) и 10 Гц (основной ротор). Когда роторы встречаются около активной зоны (5 раз в секунду, т.е. с периодом 200 мс), возникает мощный нейтронный импульс. Через 100 мс после основного импульса возникает дополнительный импульс (сателлит), что связано с прохождением основного ротора возле зоны.

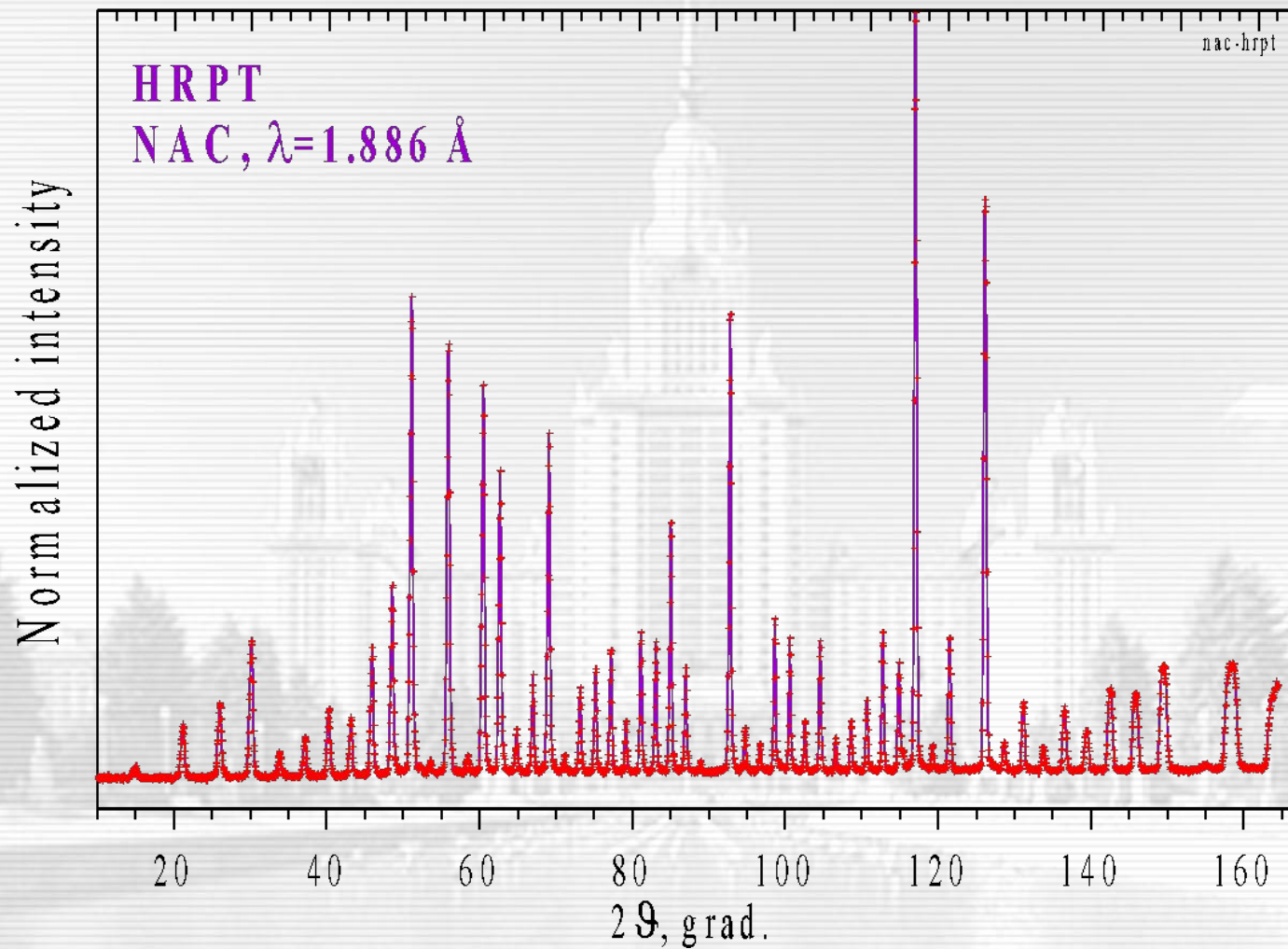


Рис. 4-3. Дифракционный спектр $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{F}_{14}$ (NAC стандарт), измеренный на HRPT при $\lambda = 1.886 \text{ \AA}$.

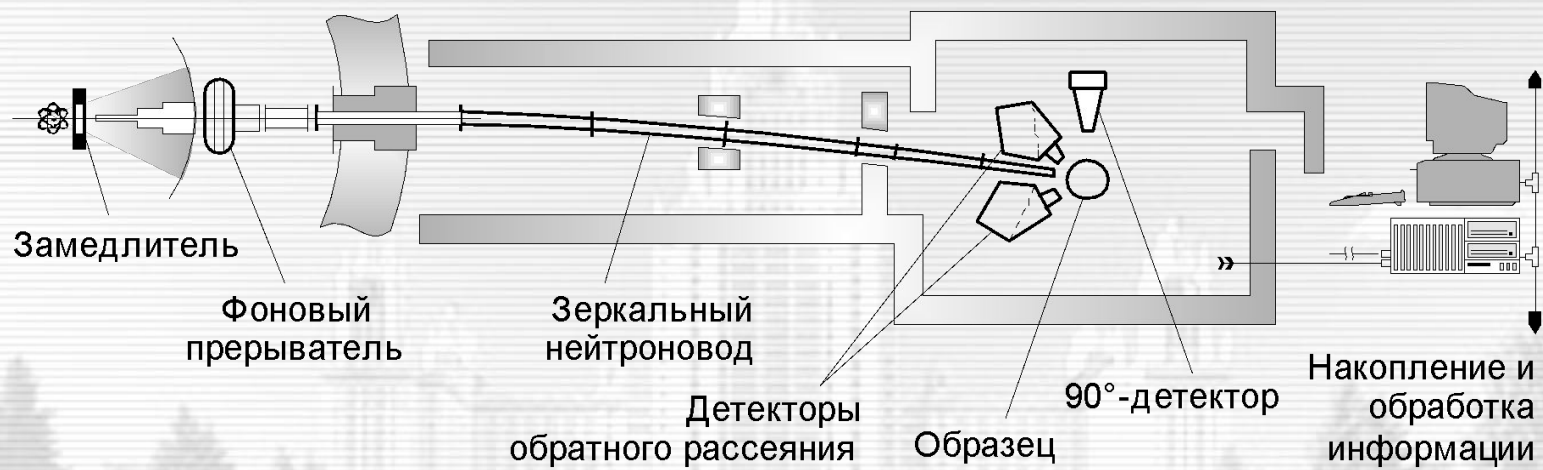


Рис. 4-4. Схема TOF-дифрактометра. Как правило, расстояние от активной зоны до места расположения образца составляет от 10 до 30 м.

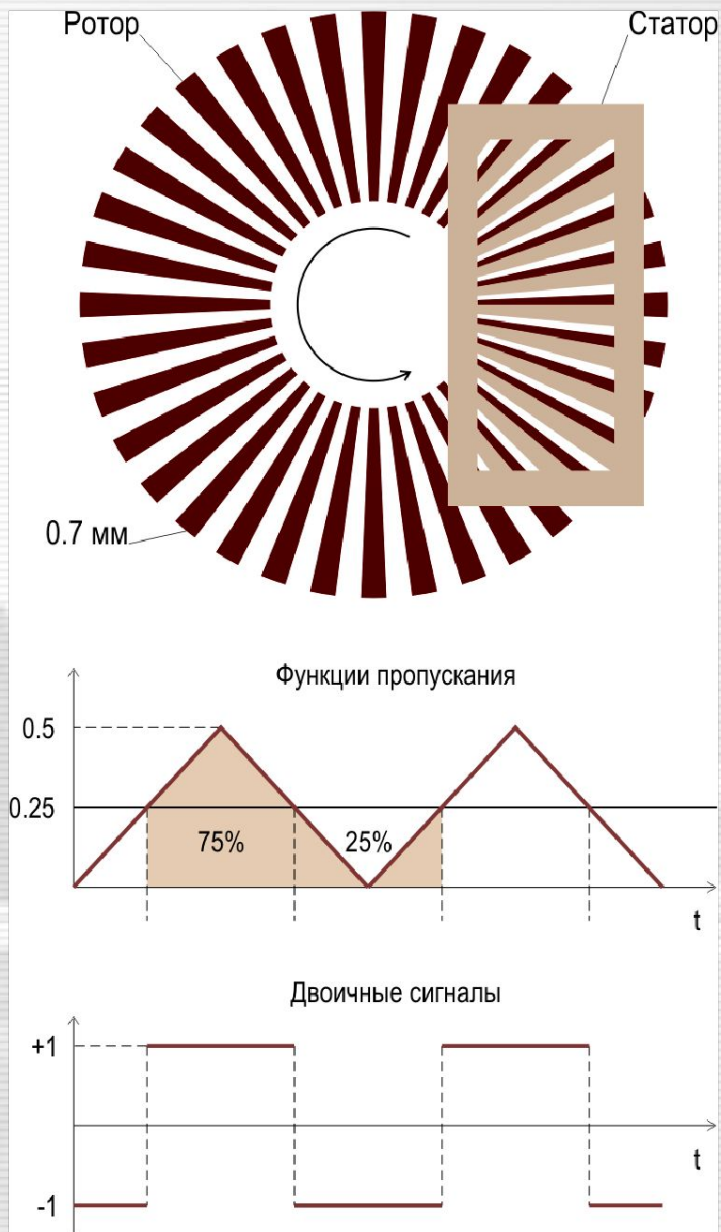


Рис. 4-5. Схема фурье-прерывателя (вверху), его функция пропускания и фазировка двоичного сигнала. Прозрачные и непрозрачные для нейтронов промежутки на роторе и статоре расположены эквидистантно. Сигналы +1 и -1 присваиваются, если пропускание больше или меньше $1/2$ от максимального.

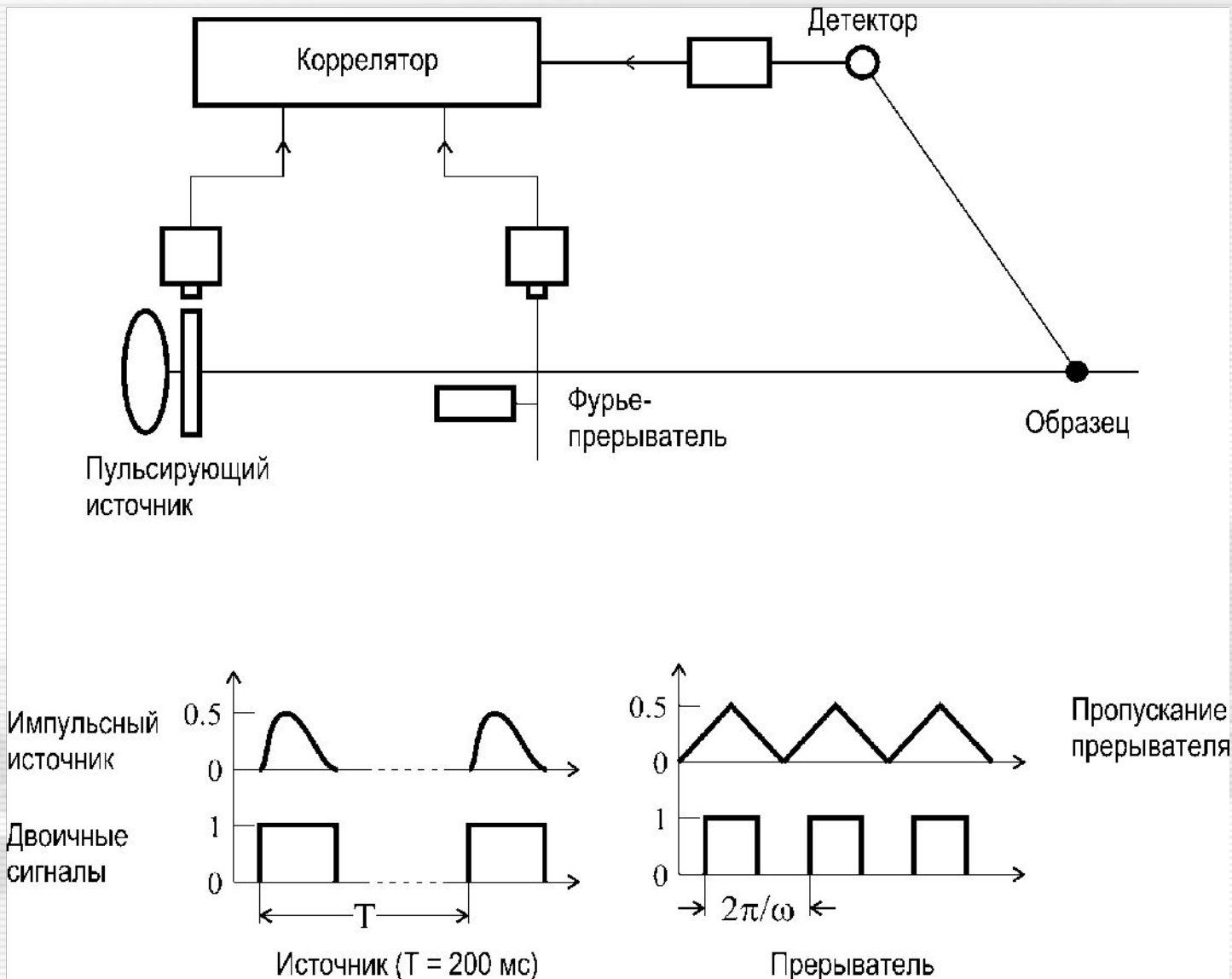


Рис. 4-6. Функциональная схема фурье-дифрактометра. На корреляционную электронику подаются сигналы, моделирующие импульс источника и пропускание прерывателя, а также сигнал от детектора.

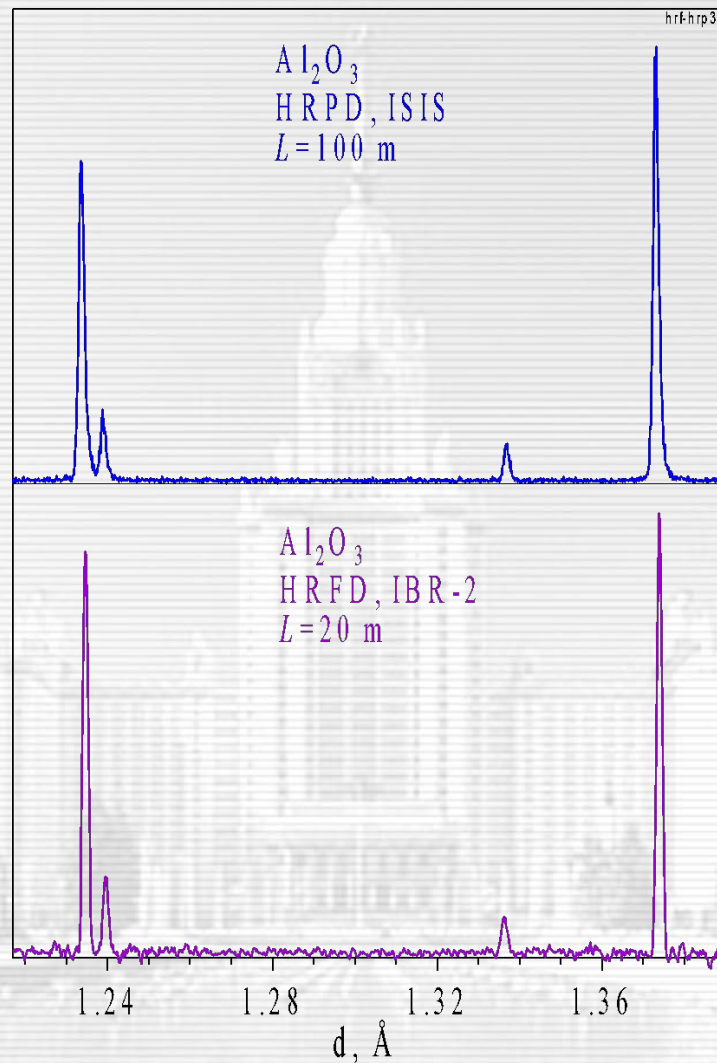


Рис. 4-7. Участок дифракционного спектра Al_2O_3 , измеренный на дифрактометрах HRPD (ISIS) и HRFD (ИБР-2). Дублет около $d = 1.24 \text{ \AA}$ удается разрешить только на дифрактометрах с $\Delta d/d \approx 10^{-3}$. Обращают на себя внимание существенно более короткое пролетное расстояние на HRFD и более высокий уровень фона на нем (корреляционный фон).

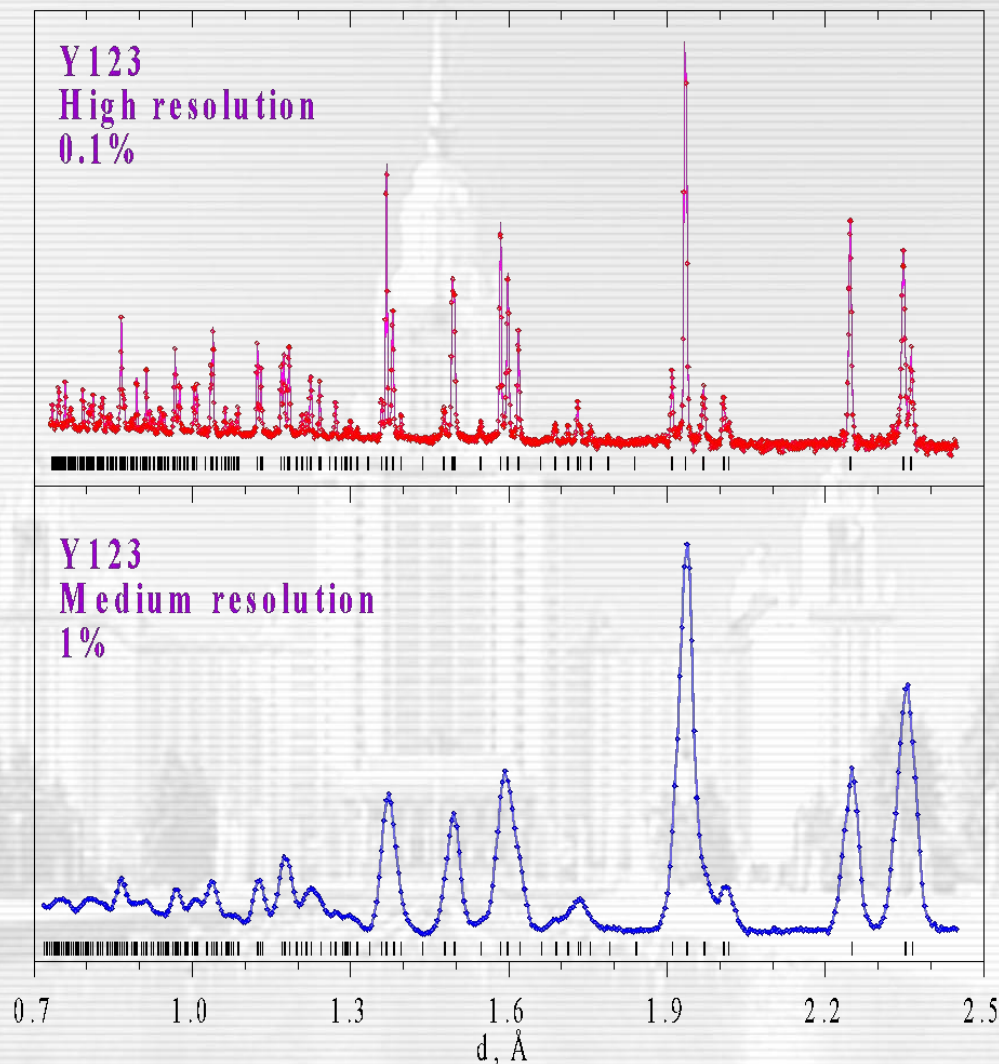


Рис. 4-8. Дифракционный спектр $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, измеренный на дифрактометре HRFD в режиме среднего ($\Delta d/d \approx 10^{-2}$) и высокого ($\Delta d/d \approx 10^{-3}$) разрешения. Качество нейтронограммы (количество разрешенных пиков) особенно улучшилось в области малых d_{hkl} .

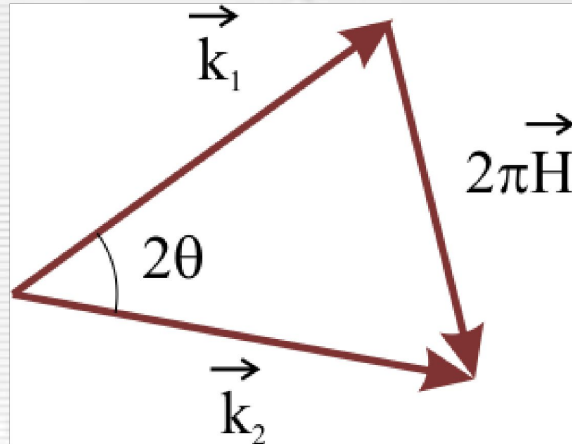


Рис. 5-1. К выводу формулы Вульфа-Брэгга. Наличие δ -функции в сечении рассеяния приводит к векторному равенству $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1 = 2\pi\mathbf{H}$. Переходя от векторов к их модулям получаем $2k\sin\theta = 2\pi\mathbf{H}$ или $2d\sin\theta = \lambda$, т.к. $|\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2| = k = 2\pi/\lambda$, $\mathbf{H} = 1/d$.

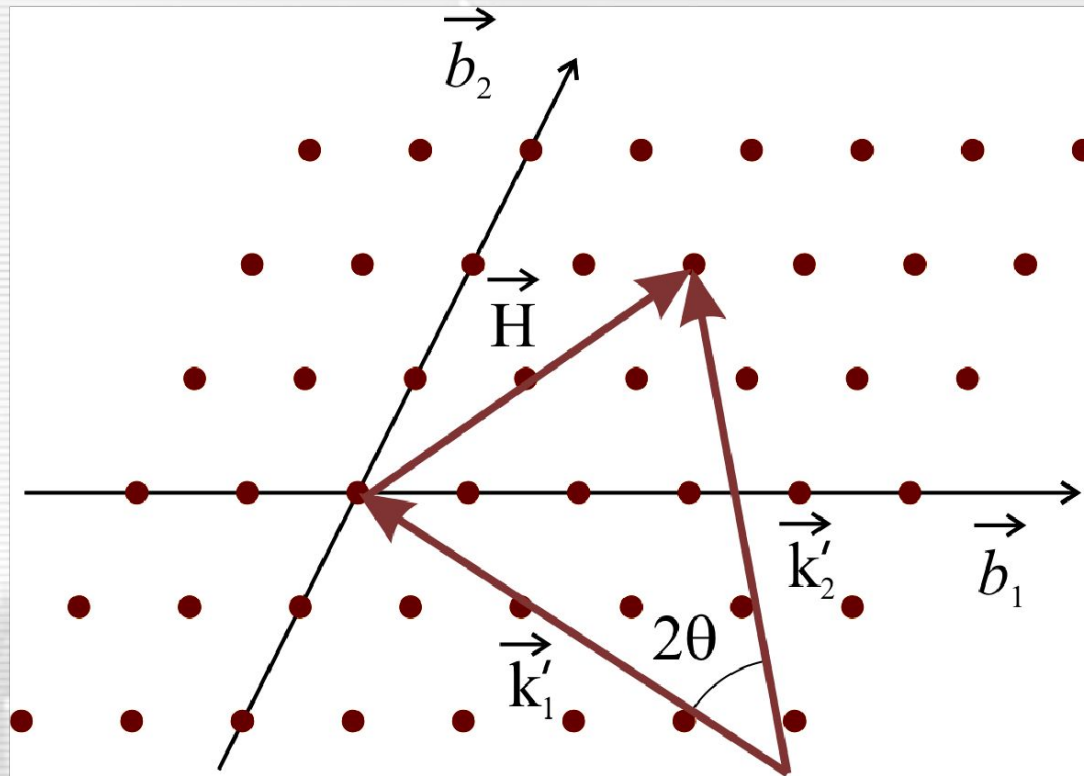


Рис. 5-2. Диаграмма Эвальда. Изображено сечение (b_1, b_2) обратной решетки и векторный треугольник $\vec{k}'_2 - \vec{k}'_1 = \vec{H}$, где штрих означает деление на 2π . В этом примере ориентация векторов \vec{k}'_2 и \vec{k}'_1 обеспечивает наблюдение дифракционного пика (220).

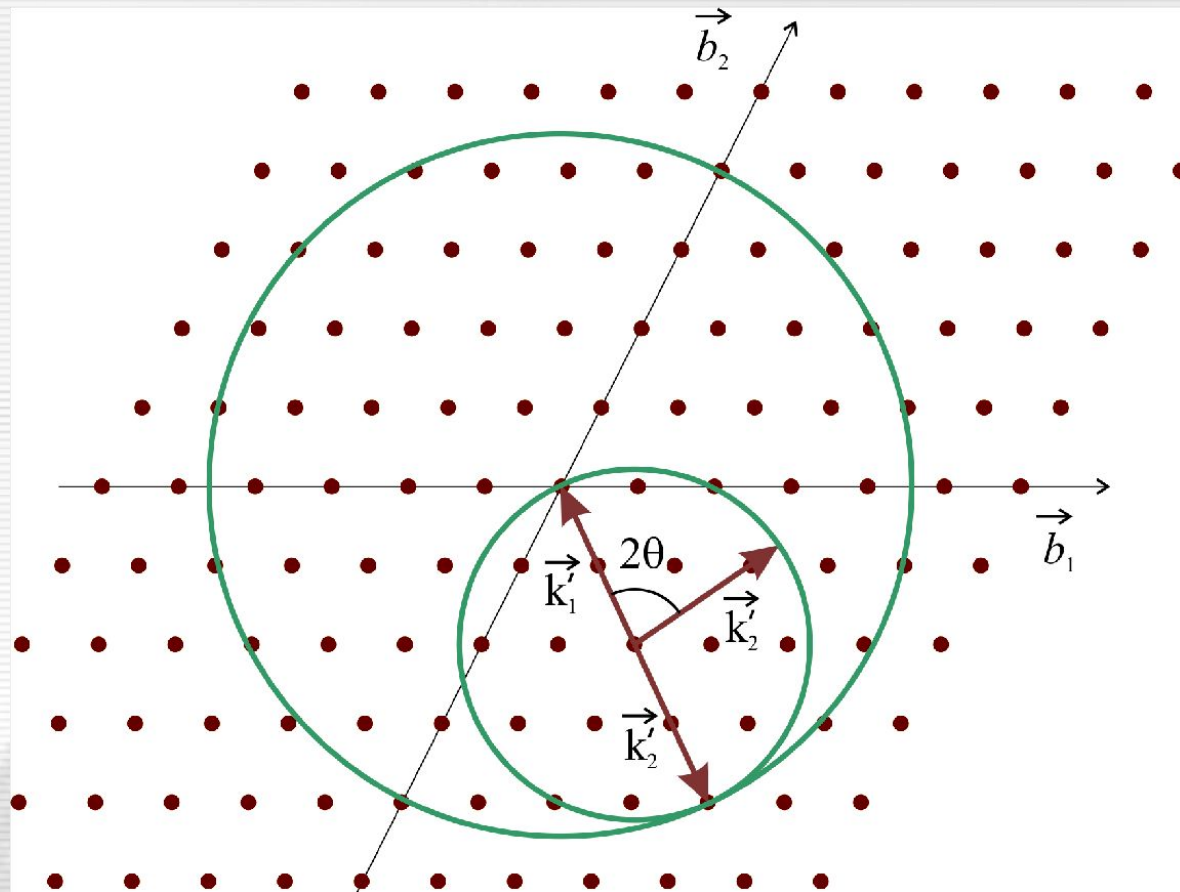


Рис. 5-3. Сферы отражения и ограничения. Изображено сечение (b_1, b_2) обратной решетки и волновые вектора падающих (\vec{k}'_1) и рассеянных (\vec{k}'_2) нейтронов. При фиксированной ориентации \vec{k}'_1 относительно осей координат кристалла изменение угла рассеяния 2θ обеспечивает регистрацию дифракционных пиков, попавших на сферу отражения (малый круг). Последовательные изменения угла рассеяния и ориентации кристалла обеспечивают регистрацию пиков во всех узлах обратной решетки, попавших внутрь сферы ограничения (большой круг).

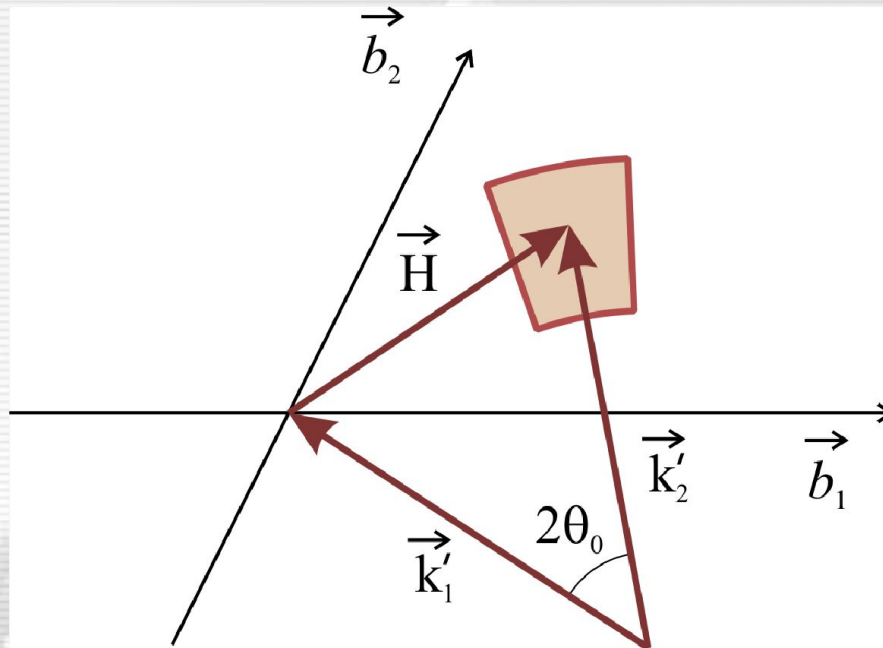


Рис. 5-4. Формирование объема разрешения в обратном пространстве. Неопределенность вдоль вектора \vec{k}'_2 связана с разбросом длин волн в первичном пучке, неопределенность по углу рассеяния 2θ связана с геометрическими характеристиками – коллимацией первичного пучка, размерами образца и детектора. Масштаб относительно величины объема разрешения не соблюден. Его линейные размеры обычно составляют доли процента от длины векторов \vec{k} и \vec{H} .

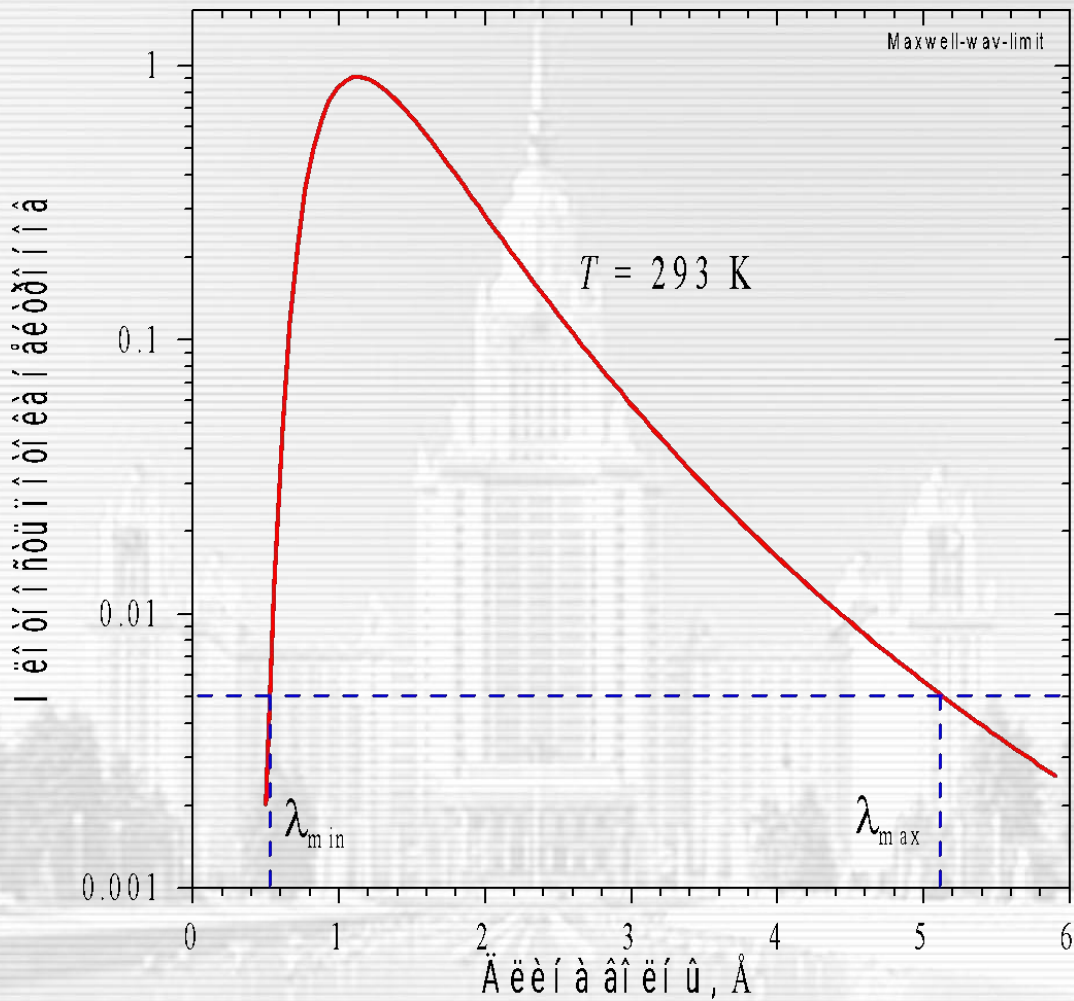


Рис. 5-5. Выбор границ (λ_{\min} и λ_{\max}) рабочего интервала при максвелловском распределении потока нейтронов. Показано распределение, соответствующее температуре 293 К (масштаб логарифмический). Границы ($\lambda_{\min} \approx 0.5 \text{ \AA}$, $\lambda_{\max} \approx 5.1 \text{ \AA}$) определяются по величине потока в ≈ 200 раз меньшего, чем значение потока в максимуме.

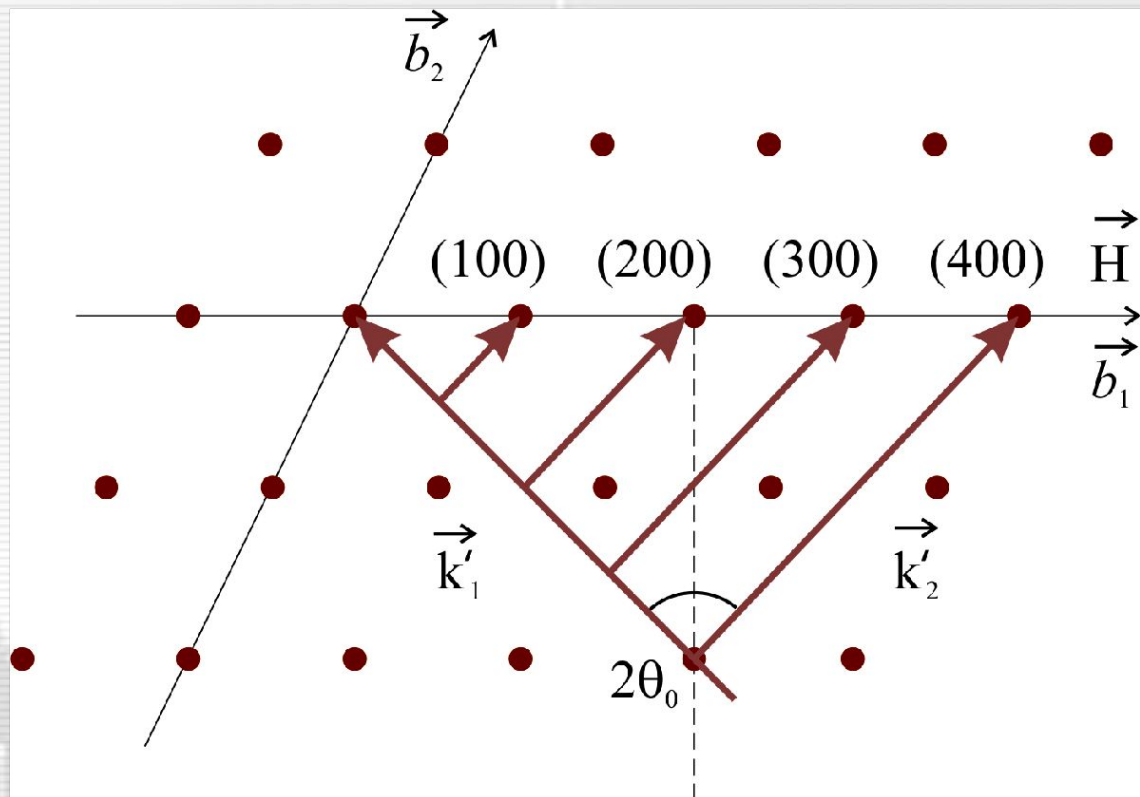


Рис. 5-6. Сканирование обратного пространства на ТОФ-дифрактометре с помощью точечного детектора. Сканирование идет вдоль направления (100). При фиксированном угле рассеяния $2\theta_0$ будут регистрироваться порядки отражения (100), (200) и т.д. Поскольку треугольник, образованный векторами \vec{k}'_1 , \vec{k}'_2 и \vec{H} , равнобедренный, то перпендикуляр, восстановленный из точки пересечения \vec{k}'_1 и \vec{k}'_2 , делит соответствующий вектор \vec{H} пополам.

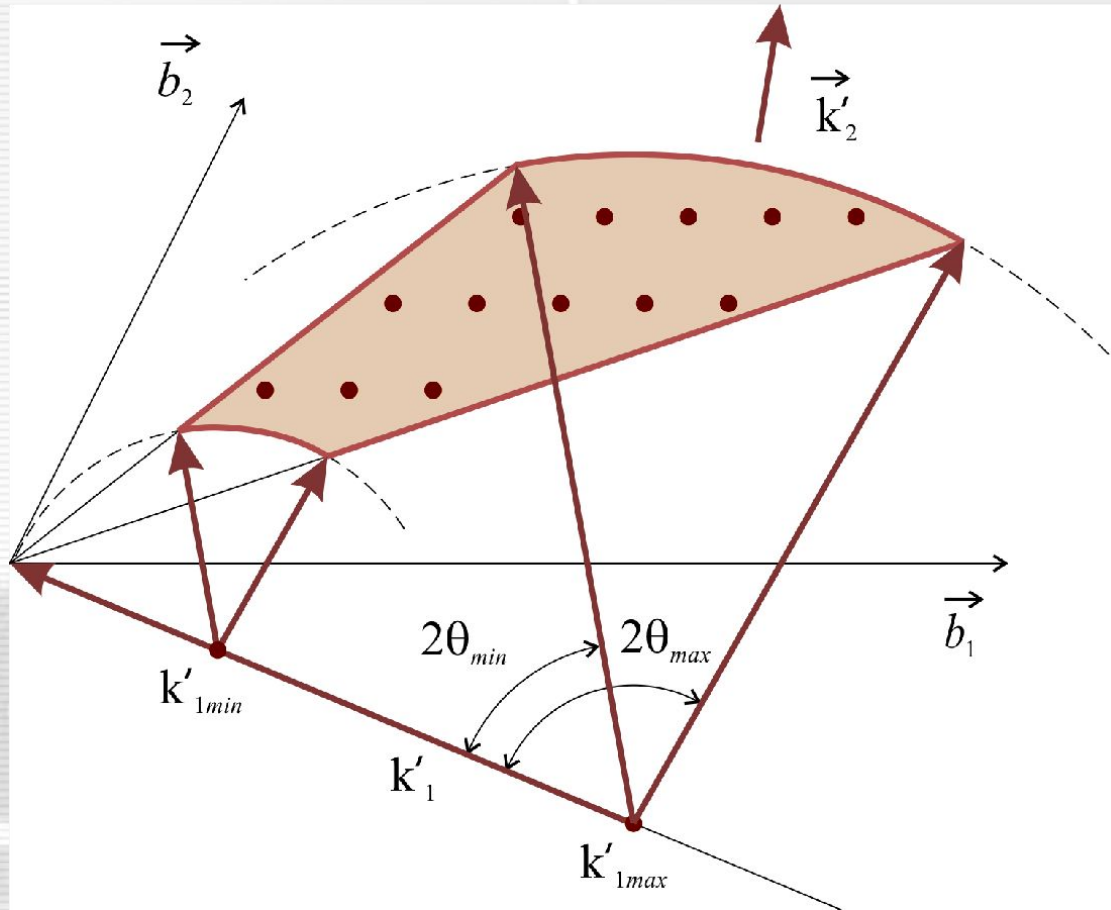


Рис. 5-7. Сканирование обратного пространства на ТОФ-дифрактометре с помощью однокоординатного (1D) ПЧД. Рабочий интервал волновых векторов (k'_{min} , k'_{max}). Детектор охватывает интервал углов рассеяния ($2\theta_{min}$, $2\theta_{max}$). Регистрируются дифракционные пики, соответствующие узлам обратной решетки, попавшим внутрь сектора.

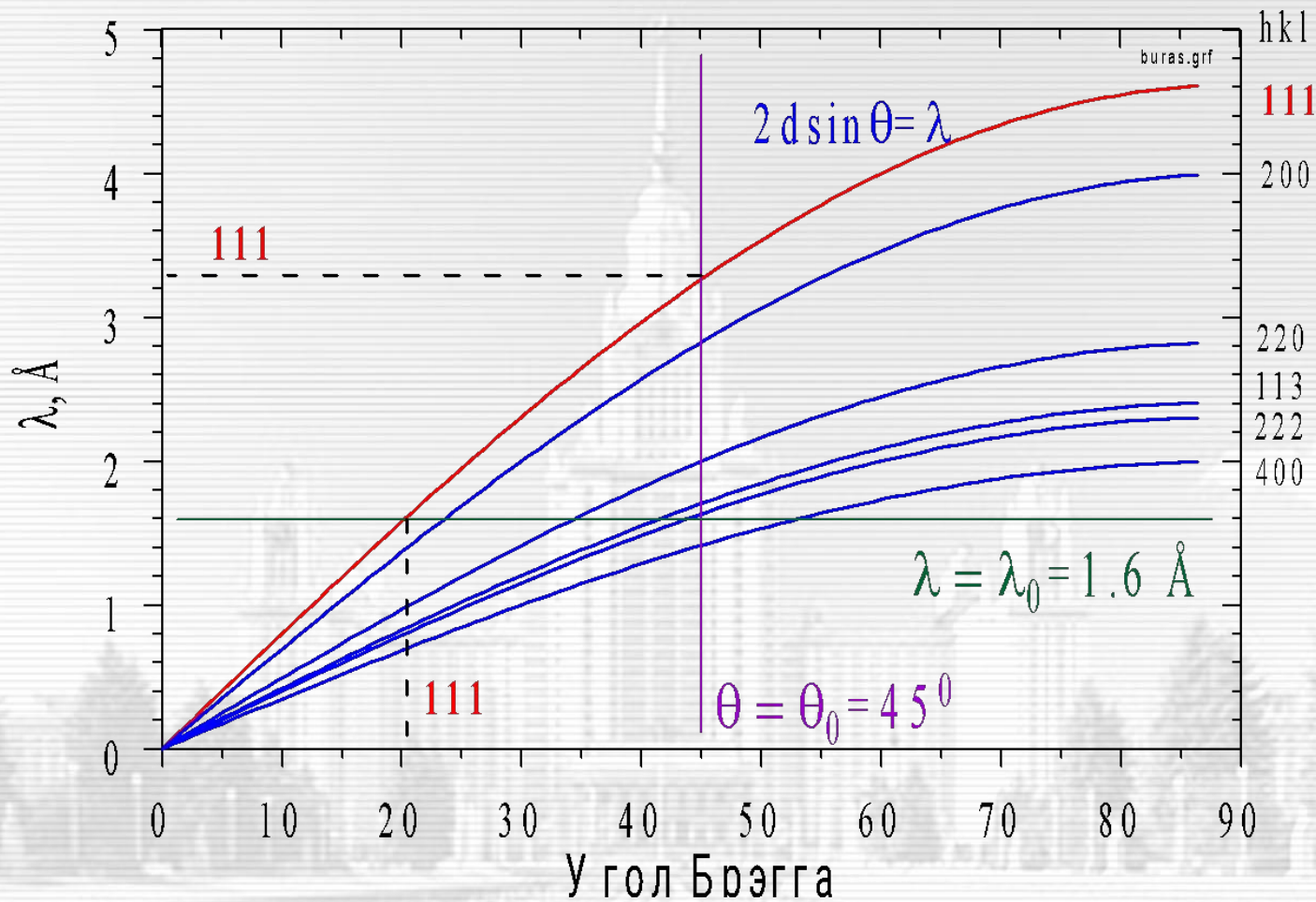


Рис. 5-8. Схема формирования дифракционного спектра от поликристалла на λ_0 -дифрактометре с $\lambda_0 = 1.6 \text{ \AA}$ и TOF-дифрактометре с детектором при $\theta_0 = 45^\circ$. Показаны кривые, соответствующие уравнению Вульфа-Брэгга для разных d_{hkl} . Дифракционные пики будут зарегистрированы при углах Брэгга или длинах волн, соответствующих пересечениям горизонтальной линии $\lambda_0 = 1.6 \text{ \AA}$ или вертикальной линии $\theta_0 = 45^\circ$ с кривыми $\lambda = 2d \sin \theta$. Отмечены значения θ и λ для пика (111).

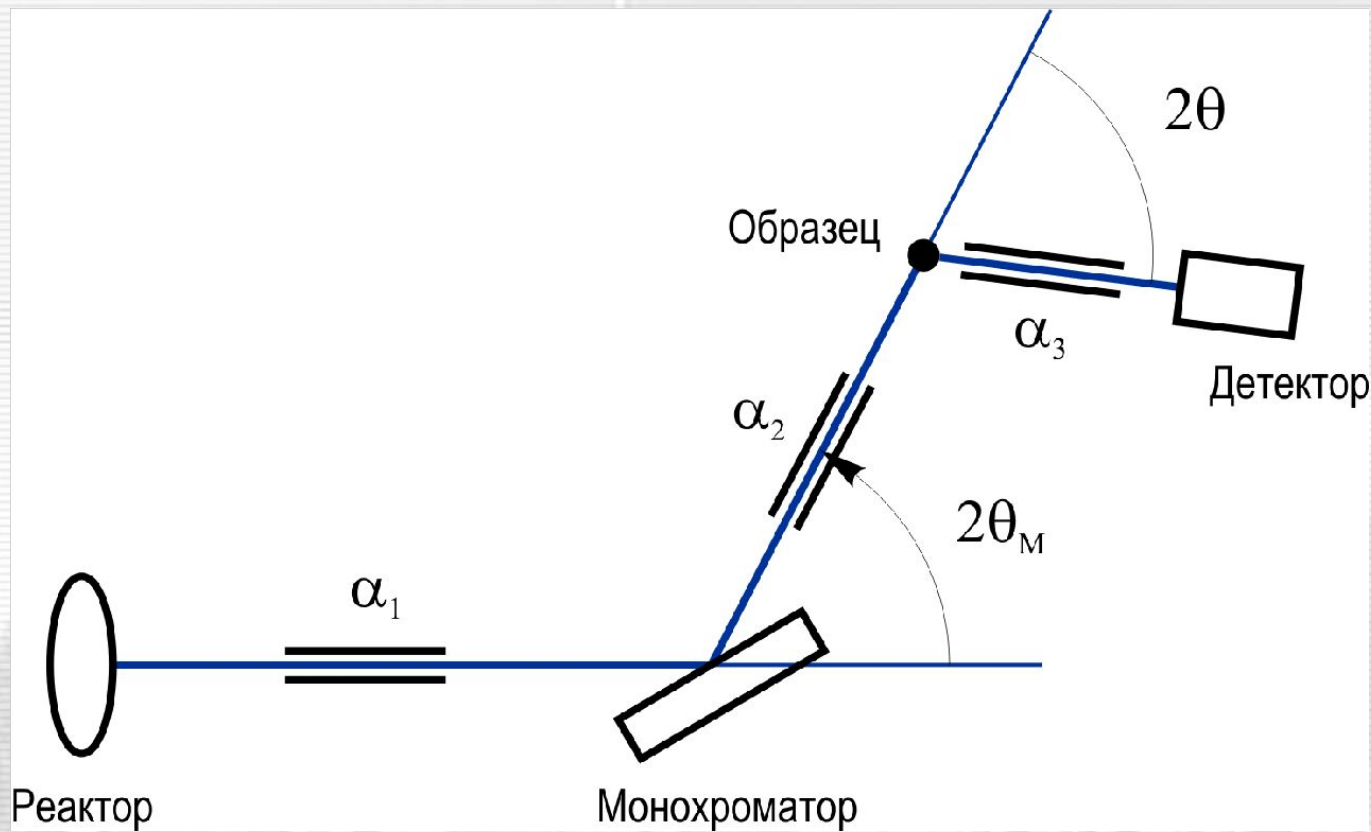


Рис. 5-10. Стандартная геометрия λ_0 -дифрактометра для поликристаллов: коллиматор с параметром α_1 (угол расходимости) перед монохроматором, монохроматор с углом Брэгга θ_M , коллиматор с параметром α_2 перед образцом, коллиматор с параметром α_3 перед детектором, стоящем на угле рассеяния 2θ .

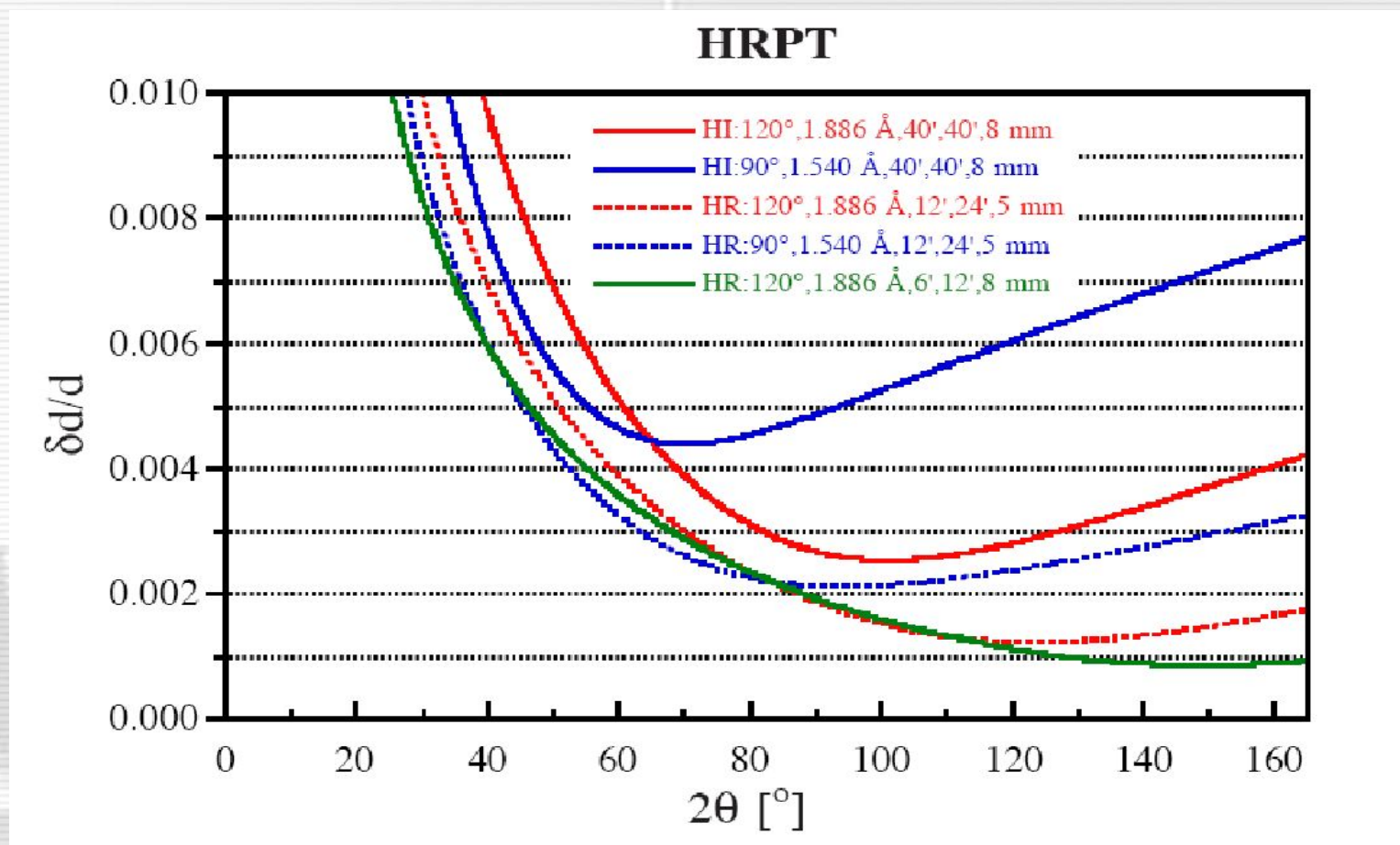


Рис. 5-11. Вычисленная функция разрешения λ_0 -дифрактометра HRPT. На вставке указано: мода настройки дифрактометра (HI – оптимизация по интенсивности, HR – оптимизация по разрешению), $2\theta_M$, длина волны нейтронов λ_0 , углы коллимации α_1 и α_2 и диаметр образца.

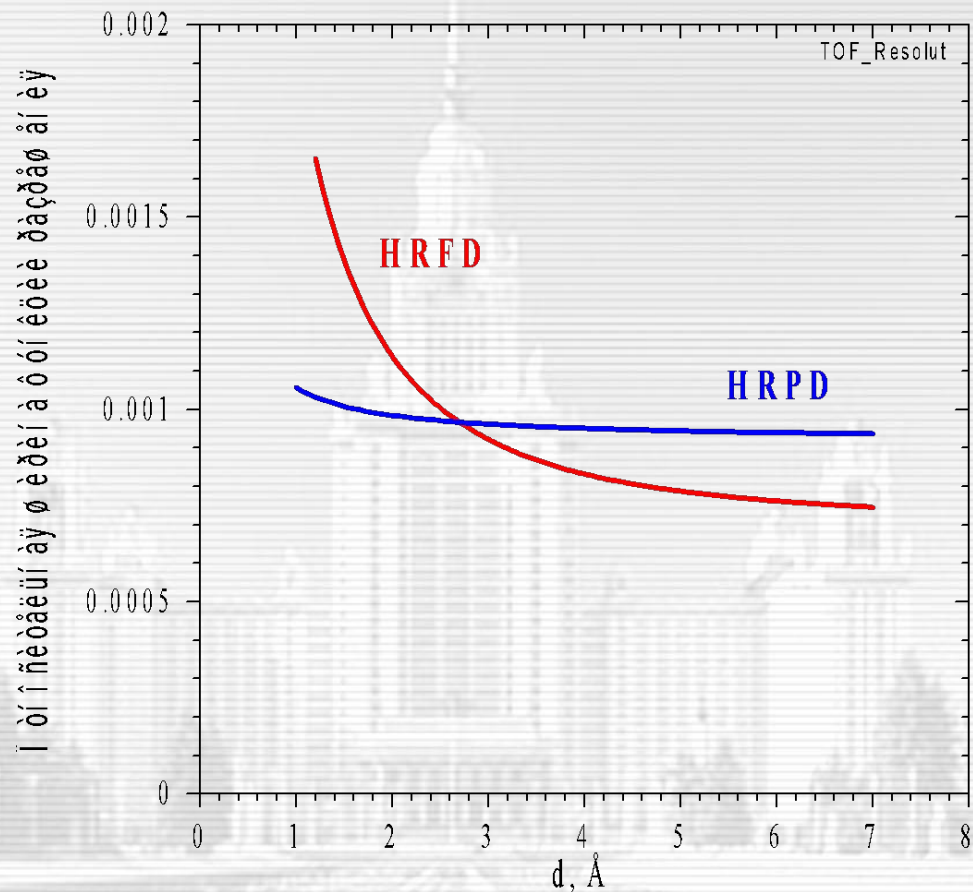


Рис. 5-12. Кривые разрешения для TOF-дифрактометра на источнике типа SPS при пролетной базе около 100 м (параметры соответствуют установке HRPD на источнике ISIS) и фурье-дифрактометра на пролетной базе около 20 м (параметры соответствуют установке HRFD на источнике ИБР-2). В обоих случаях предполагалось, что детектор установлен на большом угле рассеяния.

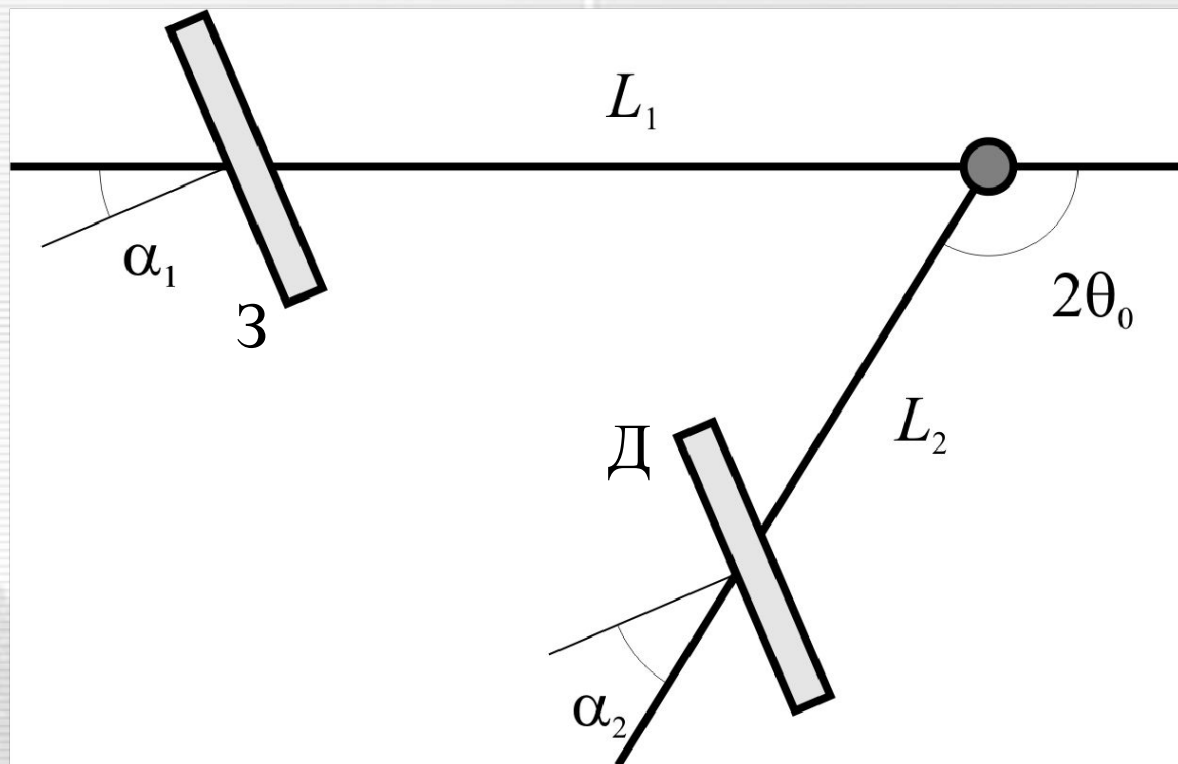


Рис. 5-13. К выводу условий фокусировки для замедлителя (З) и детектора (Д) в виде пластин. Поверхности замедлителя и детектора наклонены на углы α_1 и α_2 по отношению к средним направлениям первичного и рассеянного пучков нейтронов.

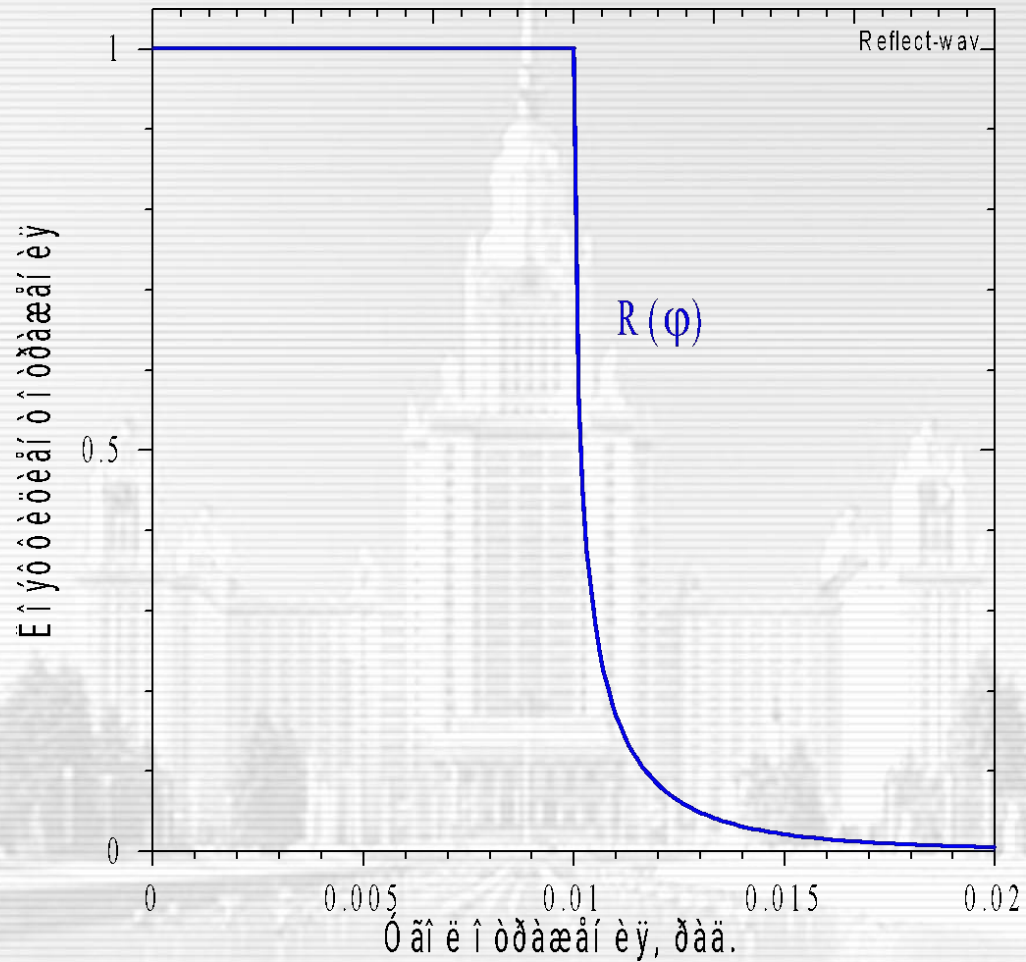


Рис. 5-14. Коэффициент отражения нейтронов от гладкой плоской поверхности. Критический угол составляет $\gamma_{cr} = 0.01$, т.е. около 34 угл. минут. Такая кривая отражения реализуется при отражении пучка с $\lambda_0 \approx 6 \text{ \AA}$ от идеально гладкой поверхности Ni.

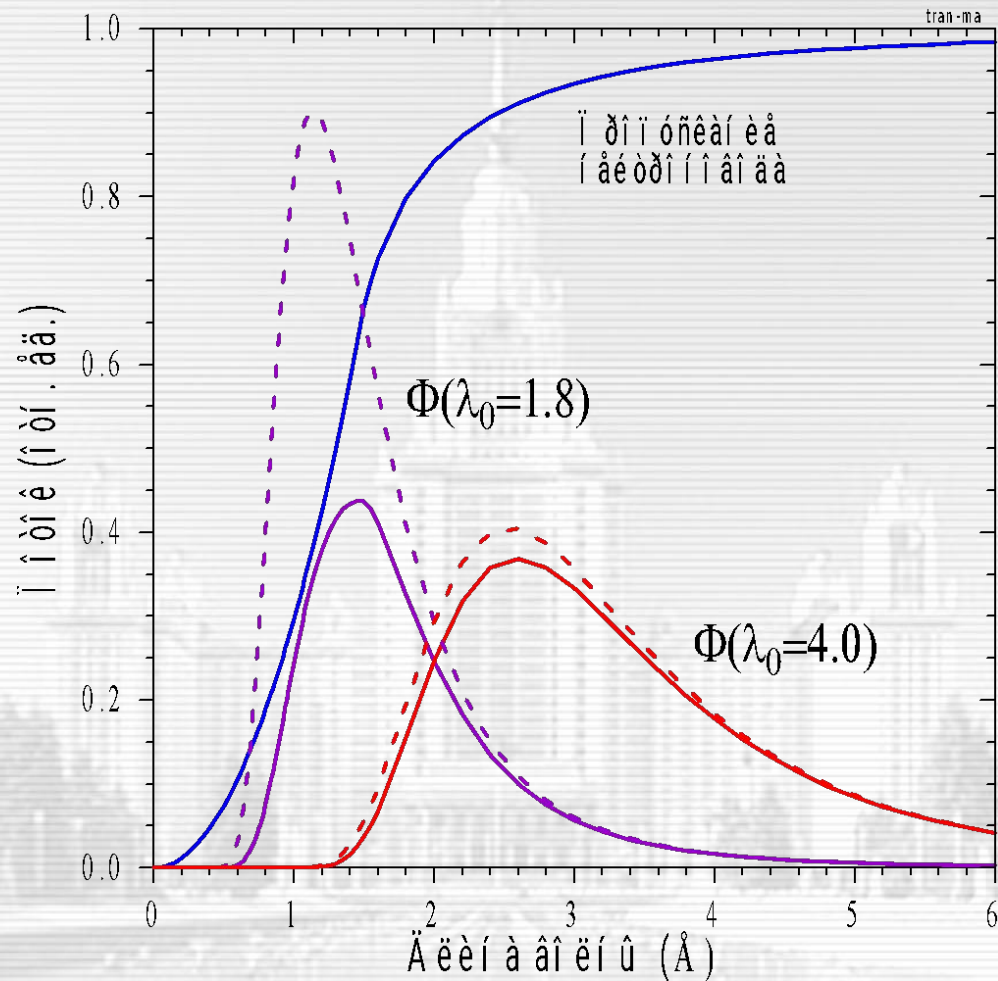


Рис. 5-15. Максвелловские спектры нейтронов (пунктирные линии) от замедлителя с $T = 300$ К ($\lambda_0 = 1.8$ Å) и $T = 60$ К ($\lambda_0 = 4.0$ Å) и их изменения (сплошные линии) после прохождения пучка нейтронов через нейтронпровод с критической длиной волны $\lambda^* = 1.5$ Å. Полный поток нейтронов от теплого замедлителя уменьшается в ~ 2 раза, тогда как поток от холодного замедлителя ослабляется незначительно.

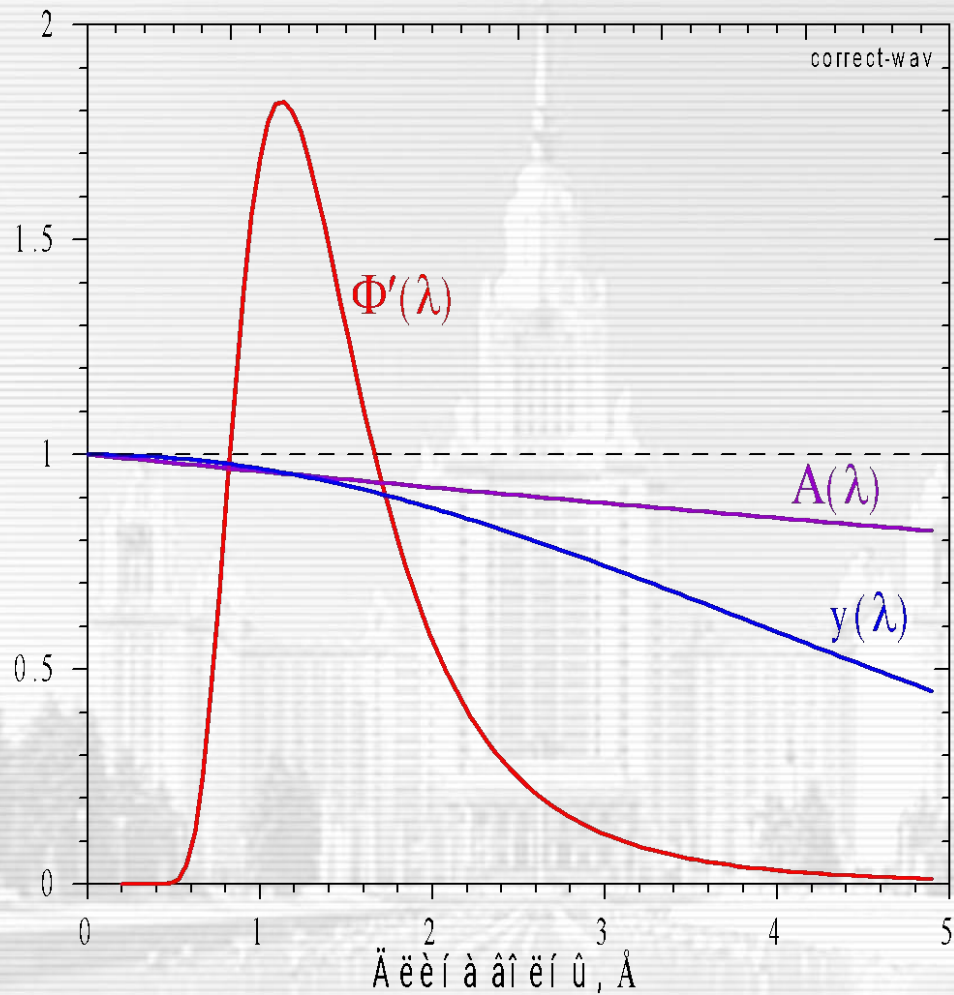


Рис. 5-16. Зависимости от длины волны эффективного спектра нейтронов, $\Phi'(\lambda)$, фактора поглощения, $A(\lambda)$, и коэффициента экстинкции, $\gamma(\lambda)$, для некоторых типичных значений параметров нейтронного дифракционного эксперимента. Функция $\Phi'(\lambda)$ приведена в произвольных единицах.

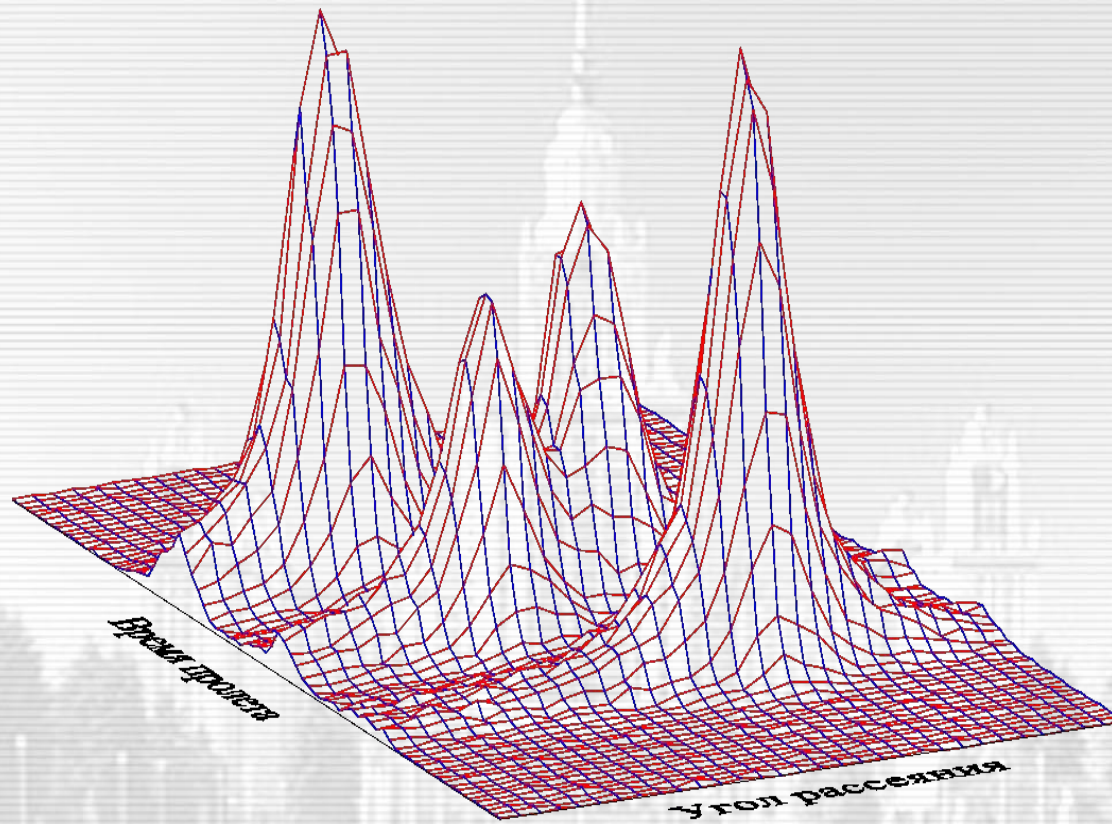


Рис. 6-1. Экспериментальное распределение интенсивности в узле (220) кристалла KD_2PO_4 при температуре $T = 80$ К. При этой температуре кристалл находится в низкосимметричной фазе, при переходе в которую узлы обратной решетки расщепились на компоненты вследствие двойникования кристалла. Одна из осей графика соответствует времени пролета нейтронов, другая – углу рассеяния (позиционным группам однокоординатного ПЧД).

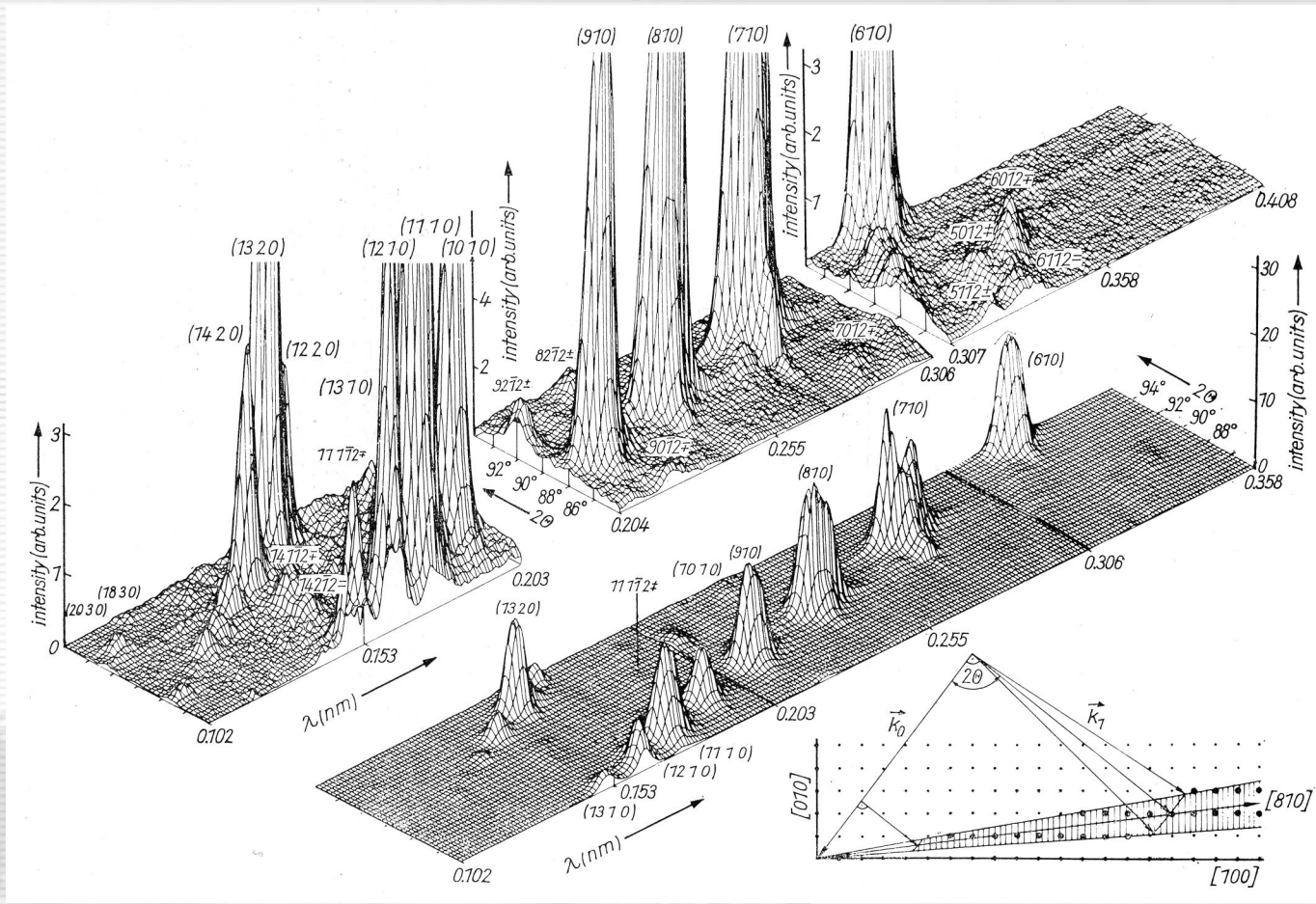


Рис. 6-2. Участок дифракционного спектра кристалла SBN, измеренный на TOF-дифрактометре с 1D ПЧД в сечении $[hk0]$. Вверху спектр представлен в увеличенном масштабе. Внизу справа показана ориентация сектора в направлении узла (810), ограниченного пределами $\pm 2.5^\circ$ по углу Брэгга. Индексы Миллера основных пиков указаны в скобках, начиная от (6 1 0) до (14 1 0). Индексы сателлитов второго порядка указаны без скобок, например, 5 0 1 2, со знаками, указывающими смещение вдоль a^* и b^* .

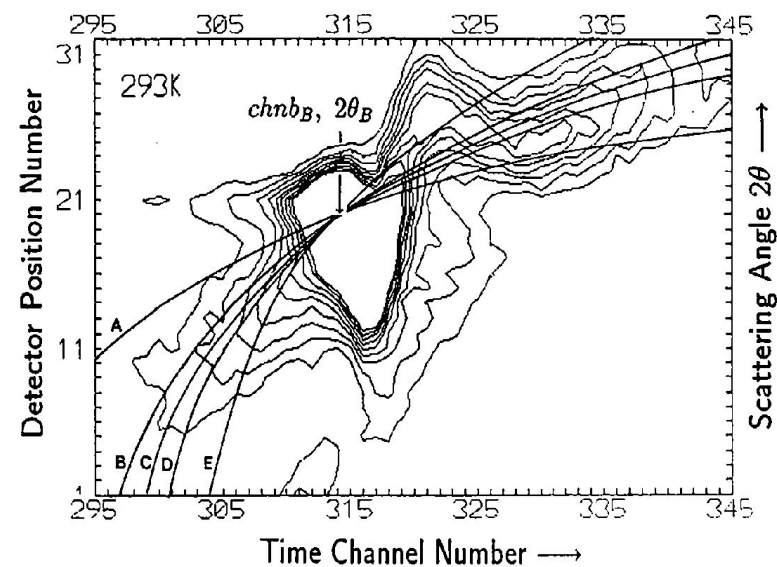
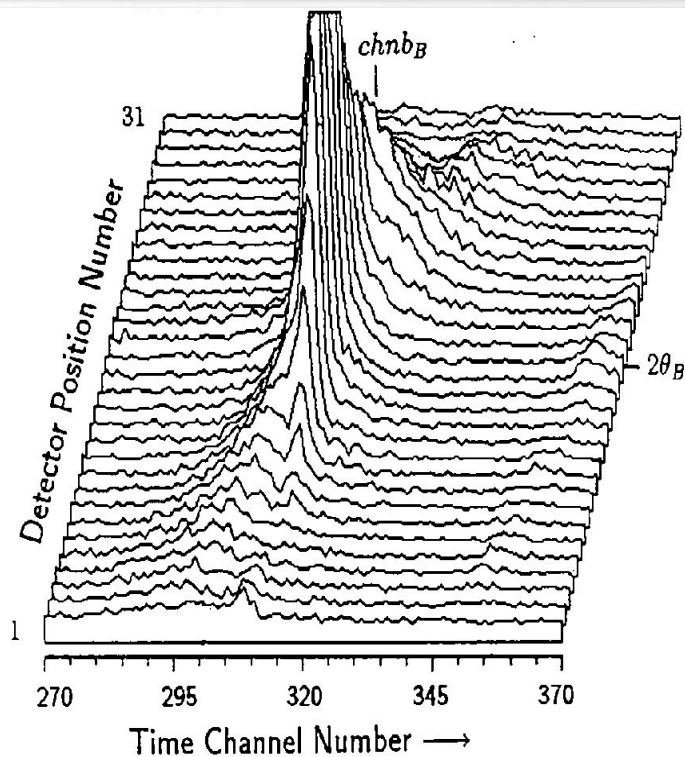


Рис. 6-3. Тепловое диффузное рассеяние нейтронов в кристаллах SBN, измеренное на TOF-дифрактометре с 1D ПЧД в окрестности узла (002) в сечении [110] и представленное в виде 3D распределения (слева) и контуров равной интенсивности (справа). Позиционные группы детектора покрывают интервал $86.3\text{--}98.5^\circ$ по 2θ . По горизонтальной оси отложены каналы анализатора времени пролета с шириной 64 мкс. Кривые A, B, C, D и E вычислены для скоростей акустических фононов $c_s = 2.5, 2.8, 2.9, 3.0$ и 3.3 км/с, соответственно. (F. Prokert et al., Acta Cryst., 1995, v.A51, p.124).

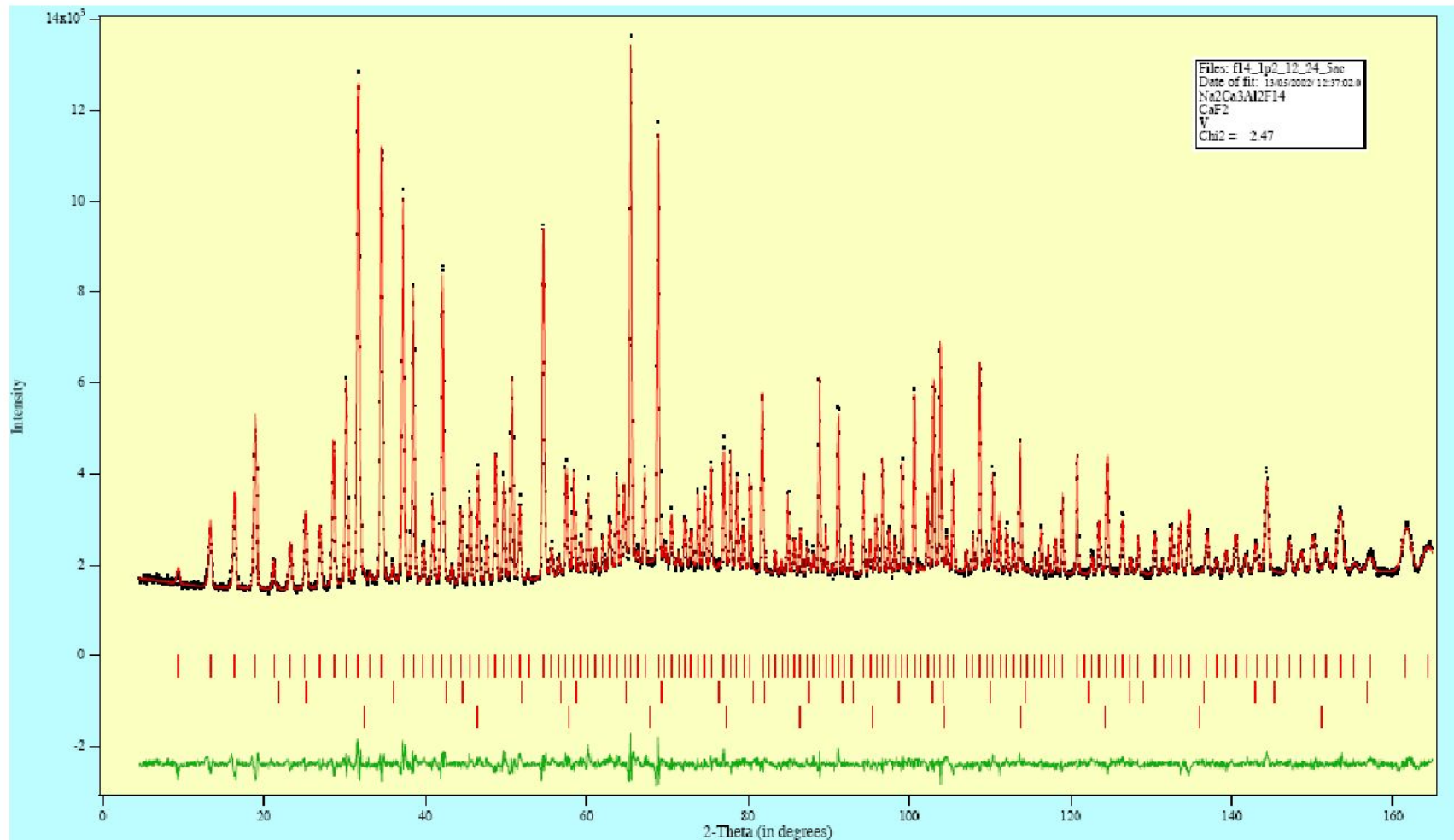


Рис. 7-1. Дифракционный спектр $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{F}_{14}$, измеренный на HRPT (SINQ) при $\lambda = 1.197 \text{ \AA}$ в моде высокого разрешения и обработанный по методу Ритвельда. Показаны экспериментальные точки, проходящая через них кривая, рассчитанная по структурной модели, и разностная функция (внизу). Кроме основной фазы, учитывались примесь CaF_2 и V (материал контейнера). Вертикальные штрихи указывают рассчитанные положения дифракционных пиков этих трех веществ. Образец находился в контейнере диаметром 5 мм, шаг по 2θ составлял 0.05° , $2\theta_M = 120^\circ$, параметры коллиматоров $\alpha_1 = 12$ и $\alpha_2 = 24$ угл. минут.

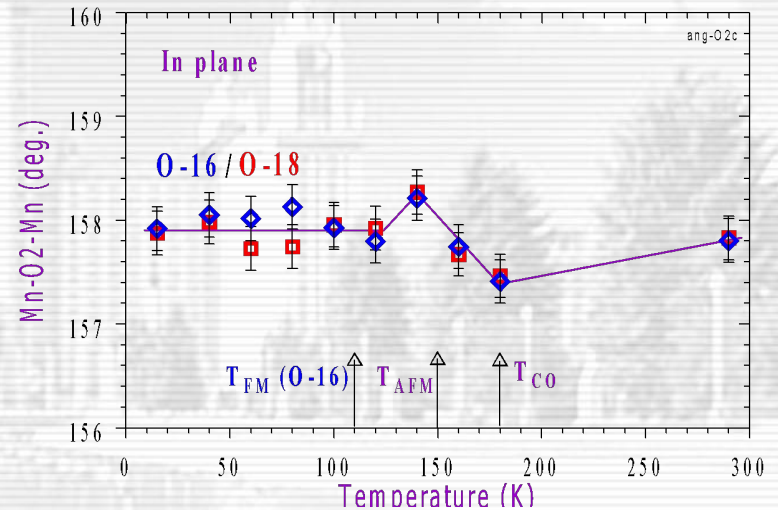
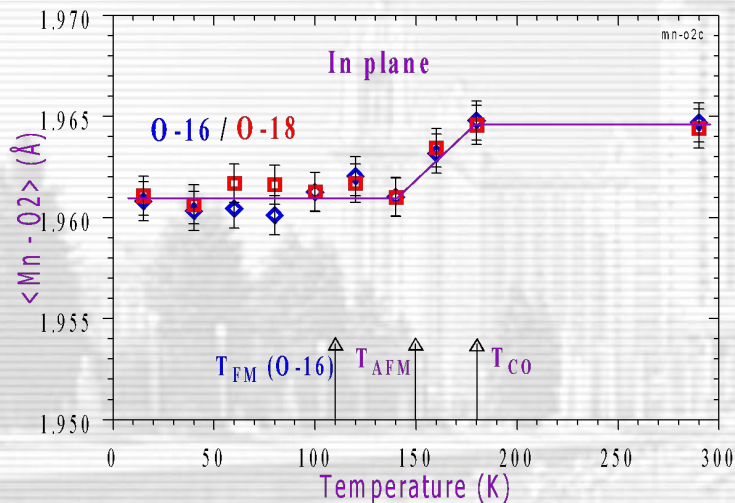
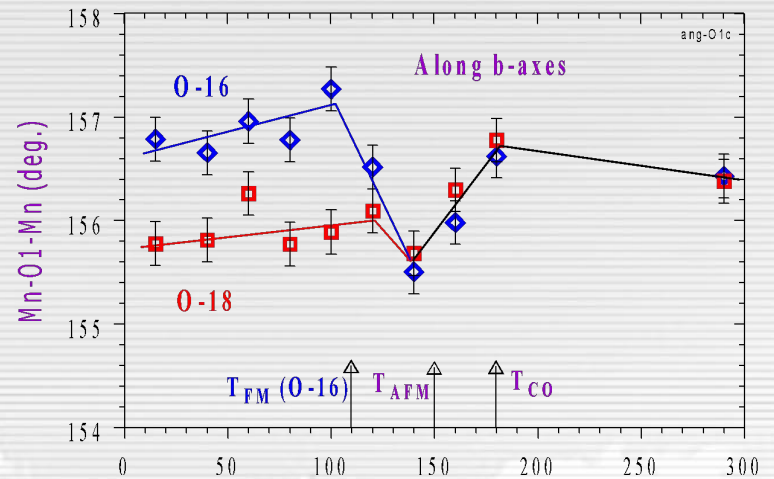
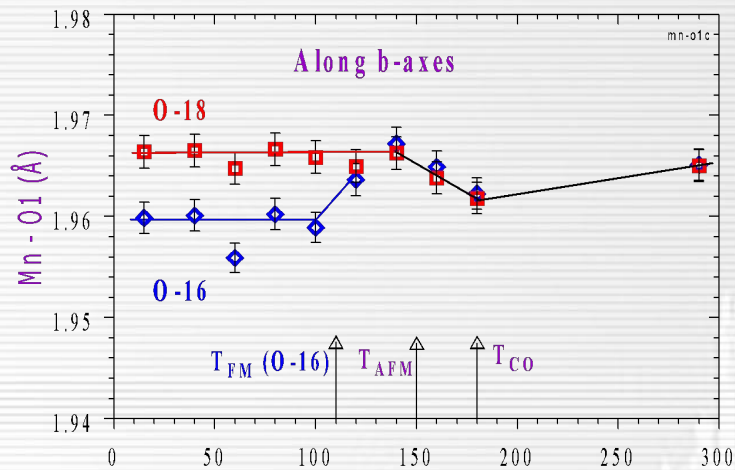


Рис. 7-2. Зависимости от температуры межатомных расстояний Mn-O (слева) и валентных углов Mn-O-Mn (справа) в соединении $(La_{0.25}Pr_{0.75})_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$, обогащенном изотопами кислорода ^{16}O (синие значки) и ^{18}O (красные значки). Указаны температуры фазовых переходов в состояние зарядового (T_{CO}), антиферромагнитного (T_{AFM}) и ферромагнитного в составе с ^{16}O (T_{FM}) упорядочений. Показаны расстояния и углы в базисной плоскости (in plane) и вдоль b -оси ячейки.

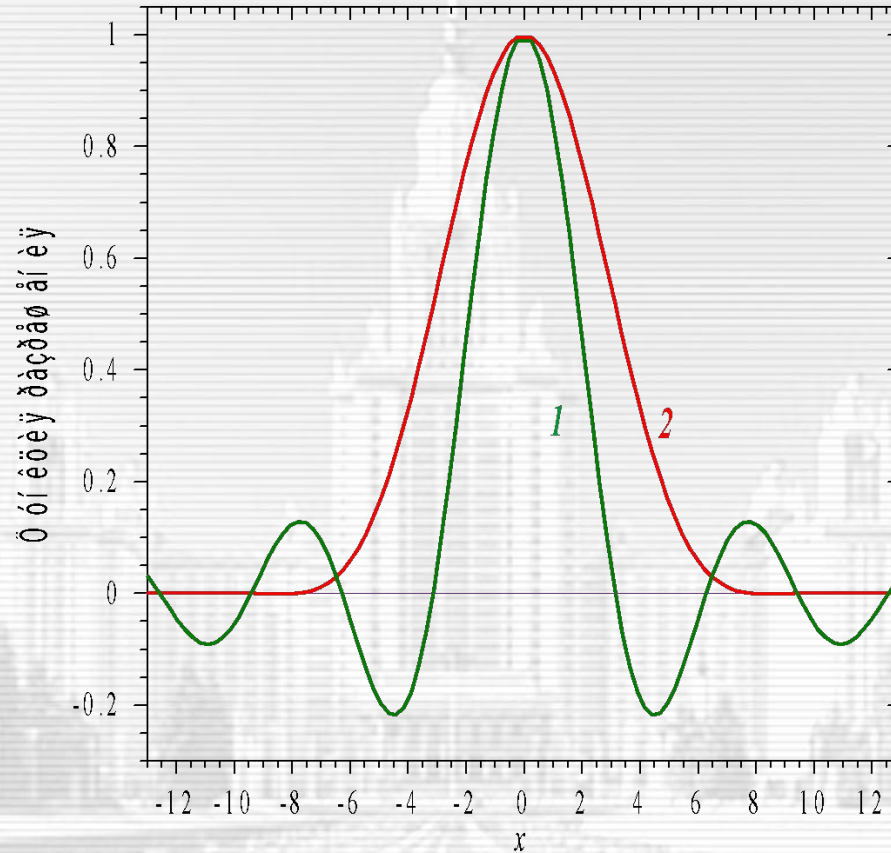


Рис. 7-3. Форма пика, измеряемого на фурье-дифрактометре с разными частотными распределениями вращения фурье-прерывателя: $g(\nu) = \text{const}$ (кривая 1), распределение Блэкмана (кривая 2).

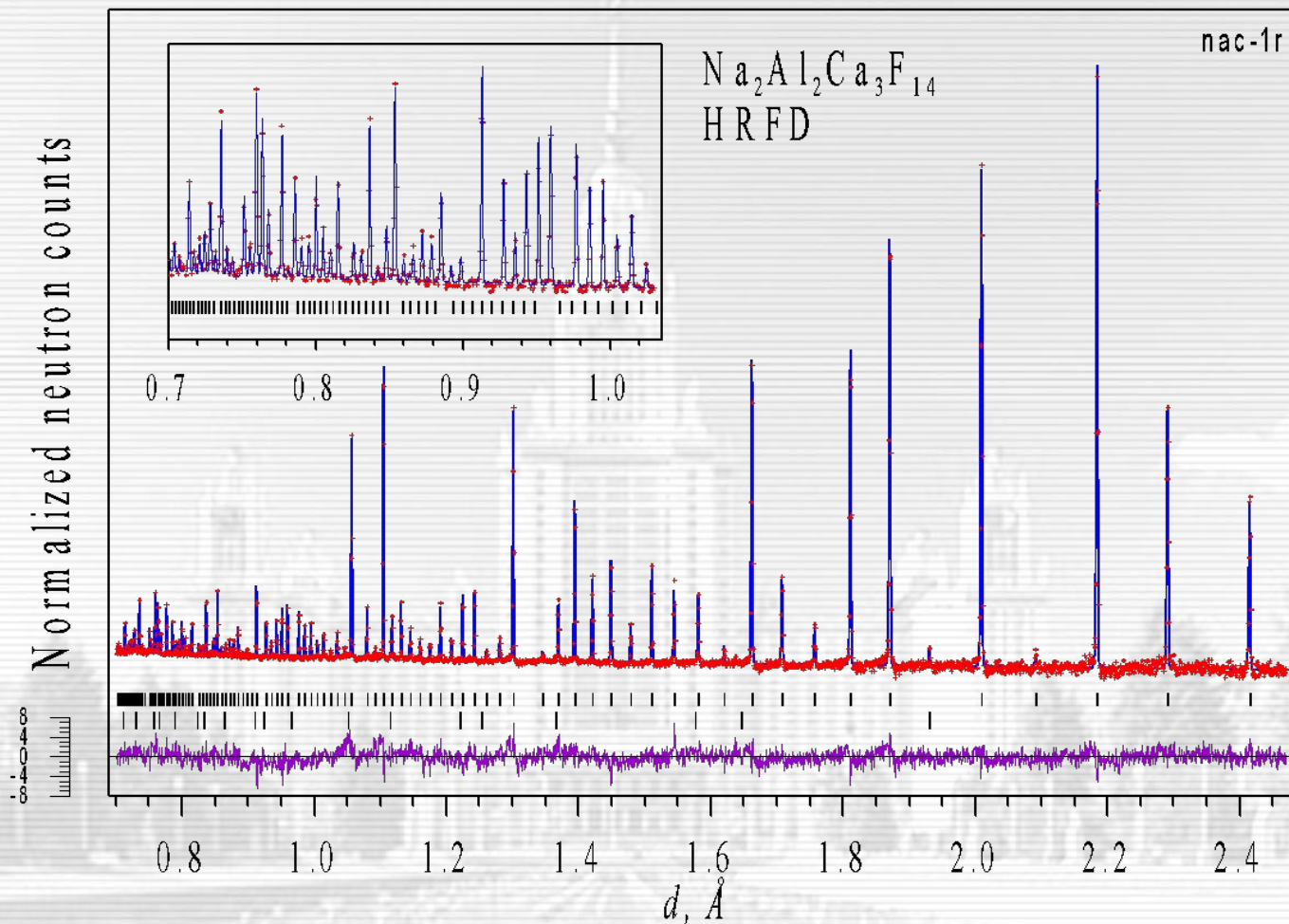


Рис. 7-4. Дифракционный спектр $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{F}_{14}$, измеренный на HRFD (ИБР-2) при скорости фурье-прерывателя 6000 об/мин и обработанный по методу Ритвельда. Показаны экспериментальные точки, проходящая через них кривая, рассчитанная по структурной модели, и разностная функция (внизу). Вертикальные штрихи указывают рассчитанные положения дифракционных пиков. Кроме основной фазы, учитывалась примесь CaF_2 .

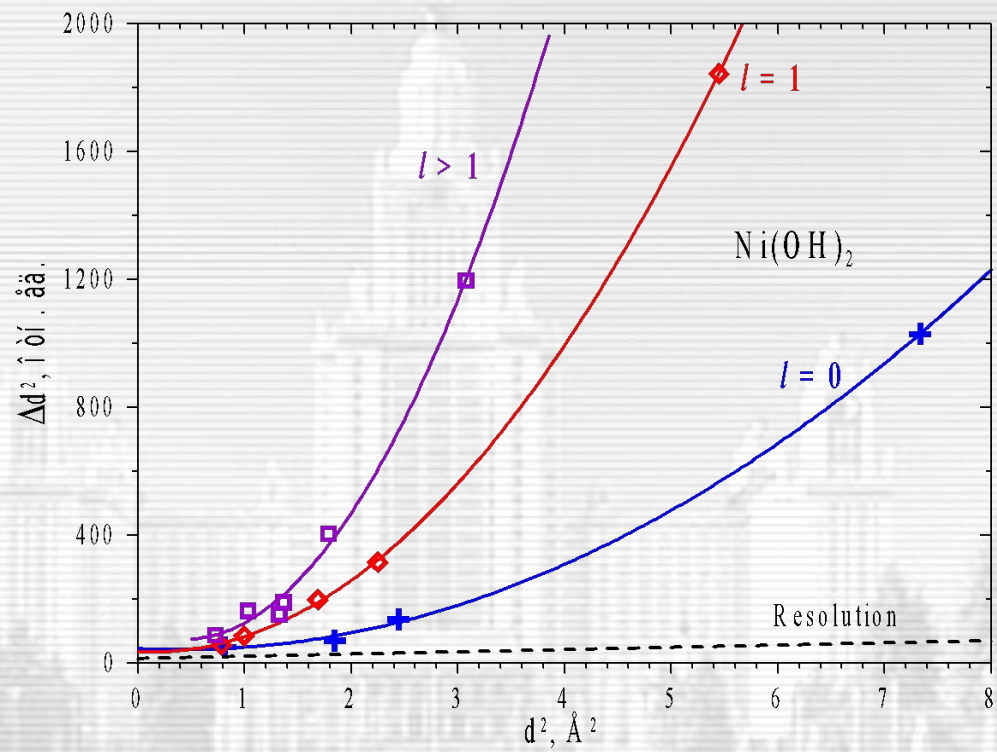


Рис. 7-5. Зависимость ширины дифракционных пиков $\beta\text{-Ni(OH)}_2$ для различных значений индекса l от d_{hkl}^2 . Сплошные линии – аппроксимация многочленом 4-й степени, пунктирной линией показан вклад от функции разрешения дифрактометра.

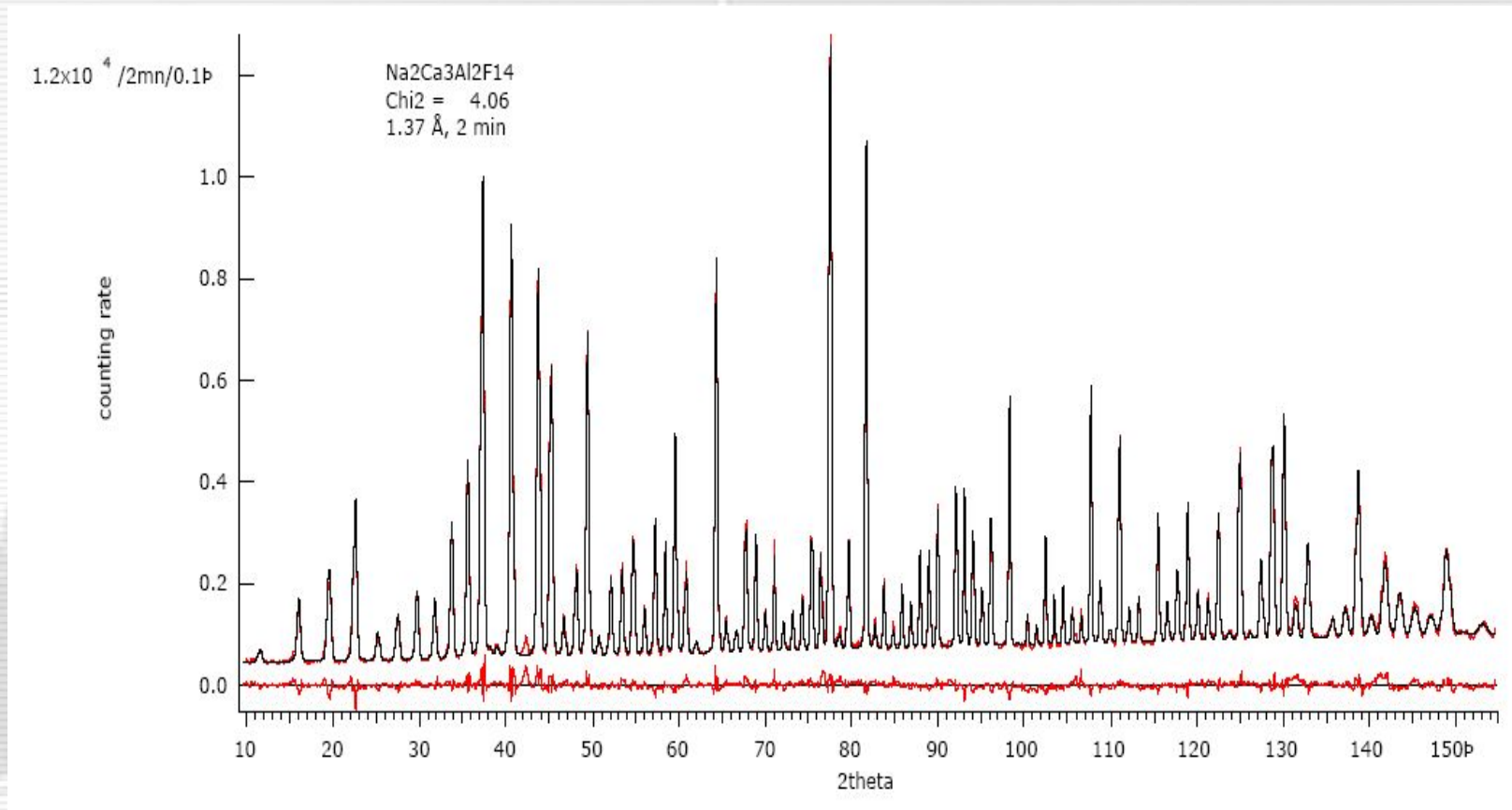


Рис. 7-6. Дифракционный спектр $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{F}_{14}$, измеренный на D20 (ILL) за 2 мин.

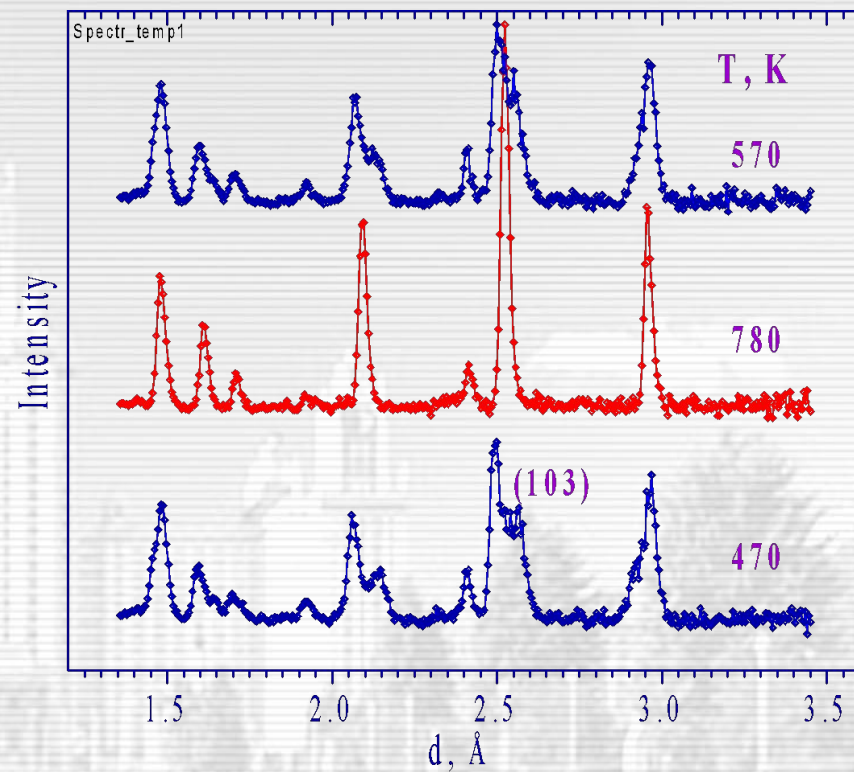
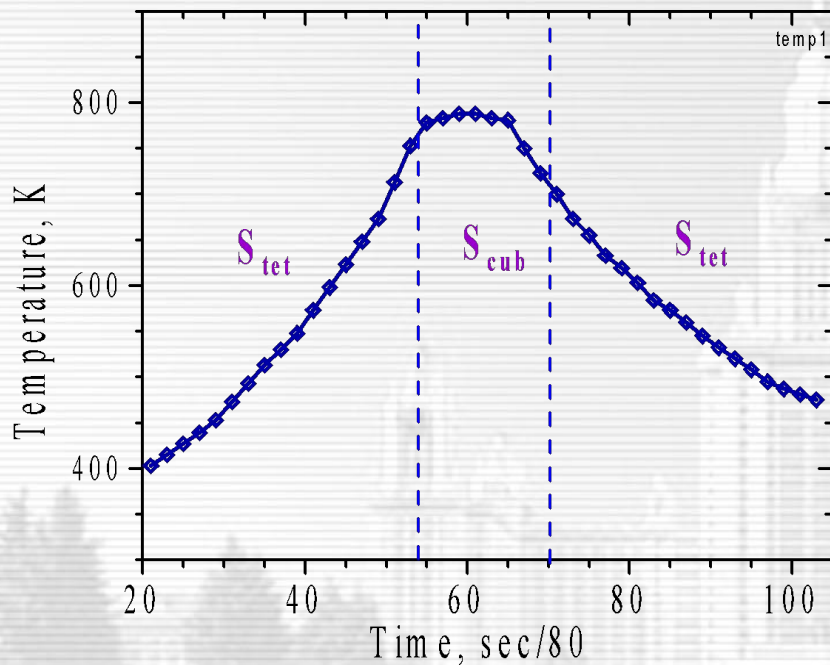


Рис. 7-7. Анализ структурного фазового перехода в шпинели $\text{CuLi}_{0.1}\text{V}_{0.1}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_4$ на ДН-2 (ИБР-2) в реальном времени с $\Delta t = 80$ сек. График изменения температуры образца показан на рисунке слева. Справа показаны характерные дифракционные спектры при нагревании ($T = 470$ К, тетрагональная фаза $Fd\bar{3}m$), после перехода в кубическую фазу ($T = 780$ К, $I4_1/adm$) и в ходе охлаждения ($T = 570$ К, $Fd\bar{3}m$).

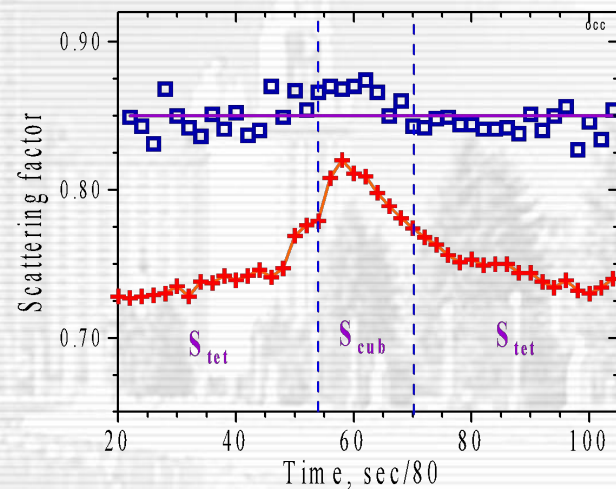
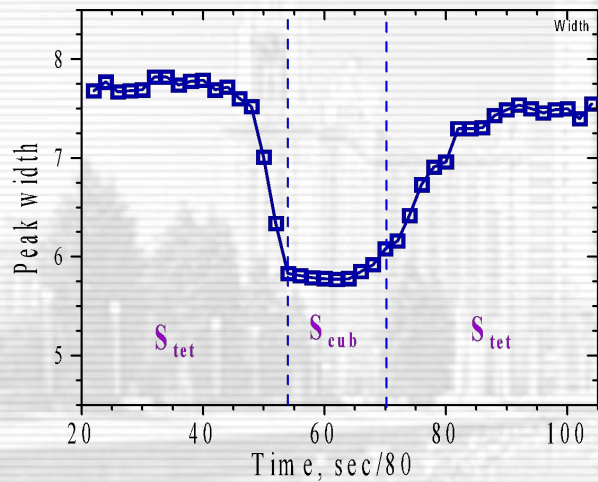
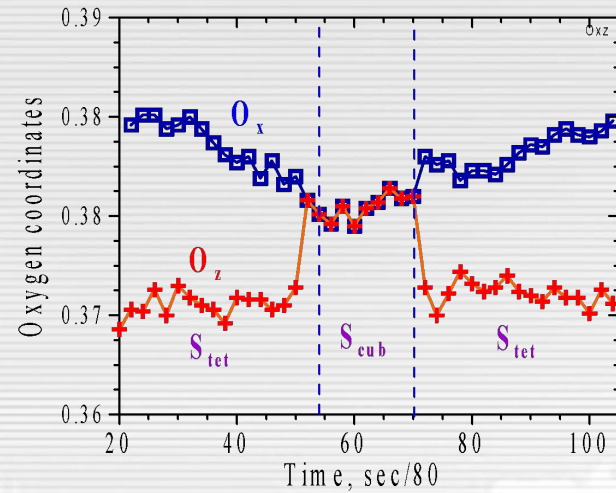
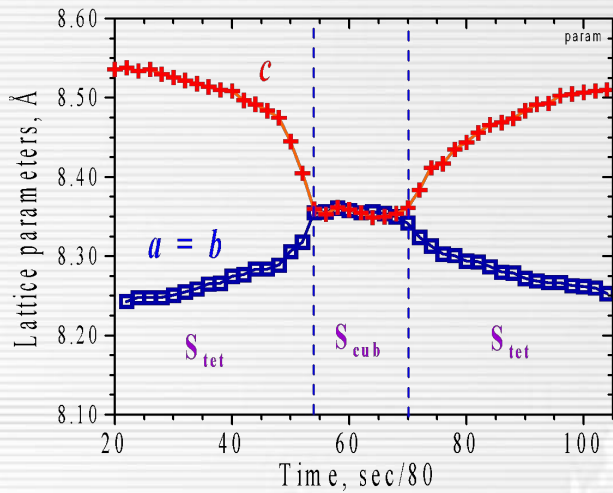


Рис. 7-8. Температурные зависимости структурных параметров шпинели $\text{CuLi}_{0.1}\text{V}_{0.1}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_4$, измеренные в ходе перехода из тетрагональной фазы ($Fd3m$) в кубическую ($I4_1/am$) и обратно. Слева показаны изменения параметров решетки (вверху) и ширины пиков (внизу). Справа показаны изменения координаты O_z (вверху) и фактора заполнения катионами различных позиций в ячейке. Границы перехода показаны вертикальными линиями.

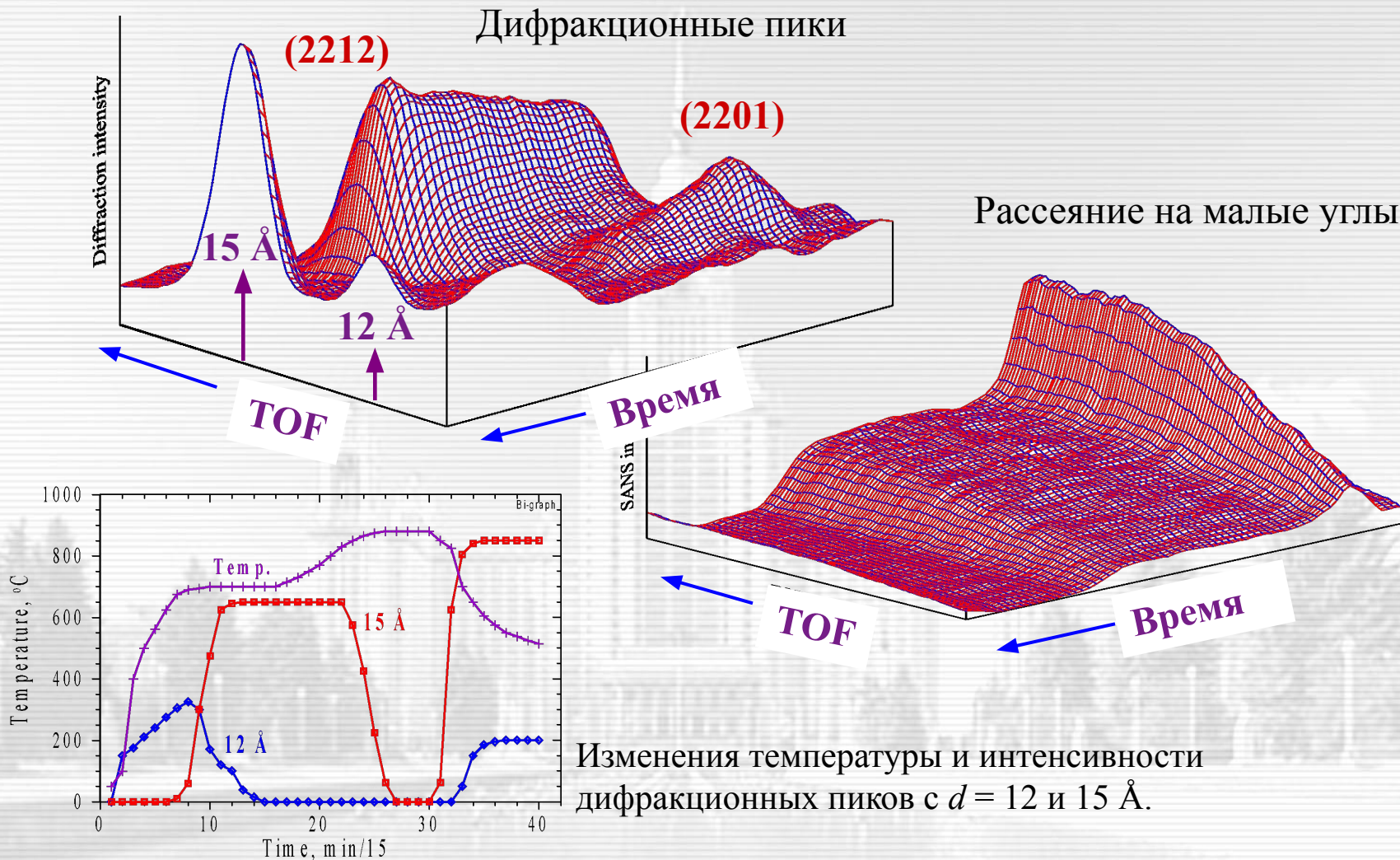
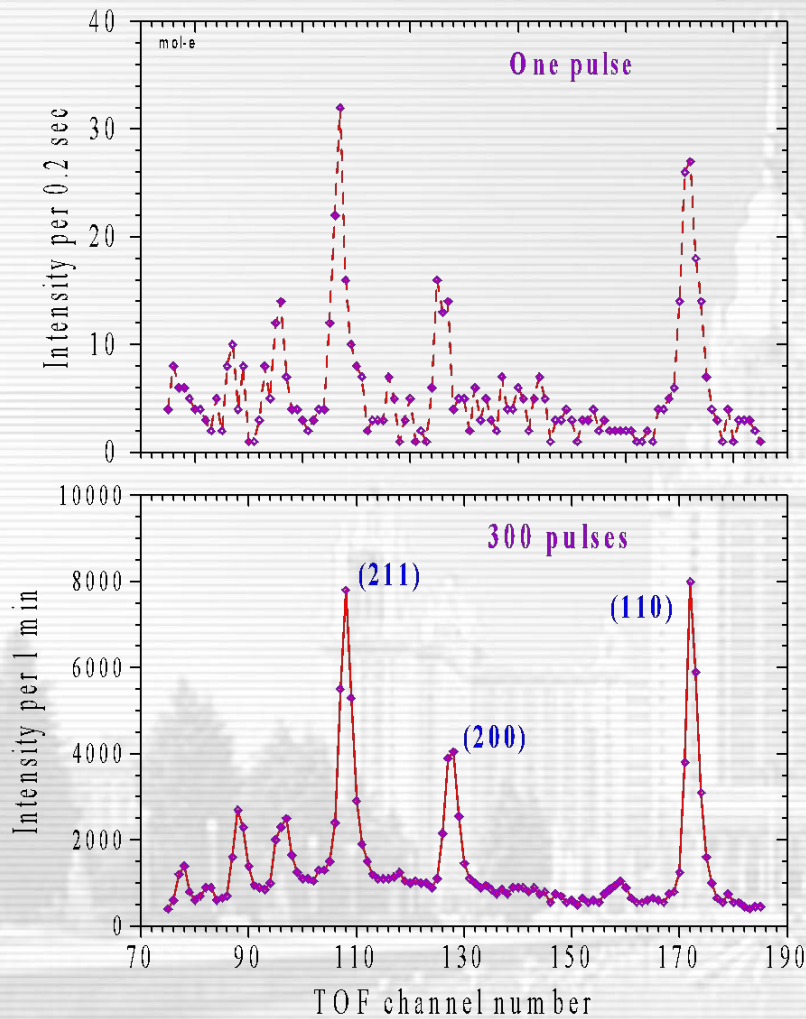


Рис. 7-9. Температурные зависимости интенсивностей дифракционных пиков (вверху слева) в диапазоне $d = 10 - 18 \text{ \AA}$ и малоуглового рассеяния (справа) в диапазоне $Q = 0.02 - 0.06 \text{ \AA}^{-1}$, измеренные в реальном времени с $\Delta t = 5$ мин в ходе превращений в $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$. При нагревании в аморфном составе сначала кристаллизуется фаза Bi-2201, которая переходит в фазу Bi-2212. После плавления при $T > 800^\circ\text{C}$ и охлаждения кристаллизуются обе фазы.



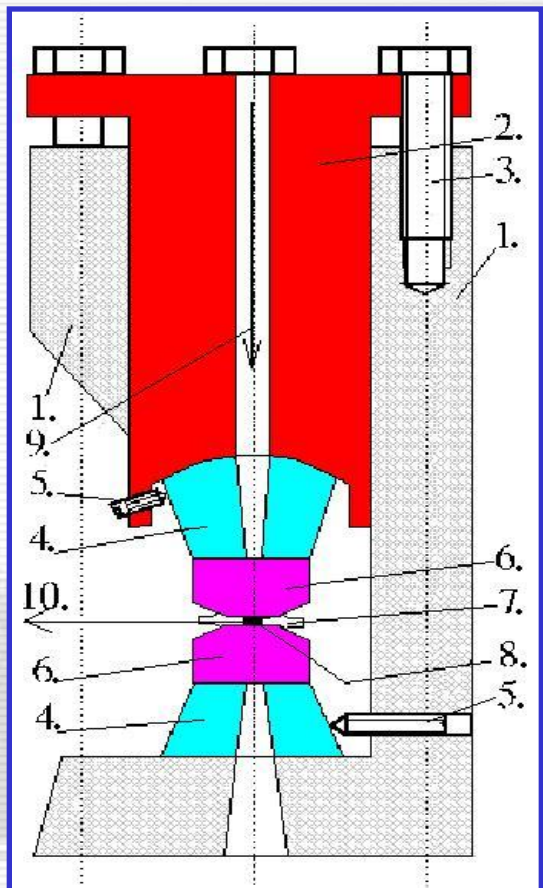
Источник

L_1

Образец

Детекторы

Рис. 7-10. Результат модельного эксперимента, проведенного на реакторе ИБР-2 с порошком молибдена. Внизу показан спектр, измеренный за 1 мин (300 импульсов ИБР-2), вверху – спектр от 1 импульса реактора. Все характерные особенности дифракционного спектра сохранились. Справа показана схема эксперимента с несколькими детекторами, позволяющая достигнуть разрешения ~ 300 мкс, при $\Delta\theta$ между детекторами $\sim 1^\circ$.



1. Корпус.
2. Поршень.
3. Нагрузочные винты.
4. Опоры из твердого сплава.
5. Юстировочные винты.
6. Наковальни из монокристаллов сапфира.
7. Прокладка.
8. Образец.
9. Первичный пучок нейтронов.
10. Пучок рассеянных нейтронов.



Рис. 7-11. Камера высокого давления с сапфировыми наковальнями.

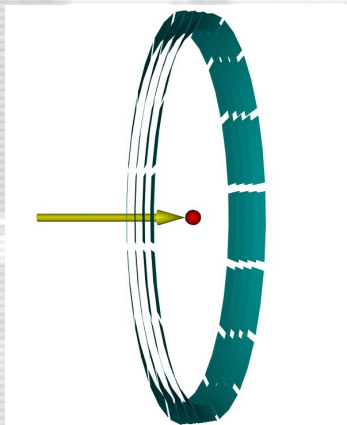
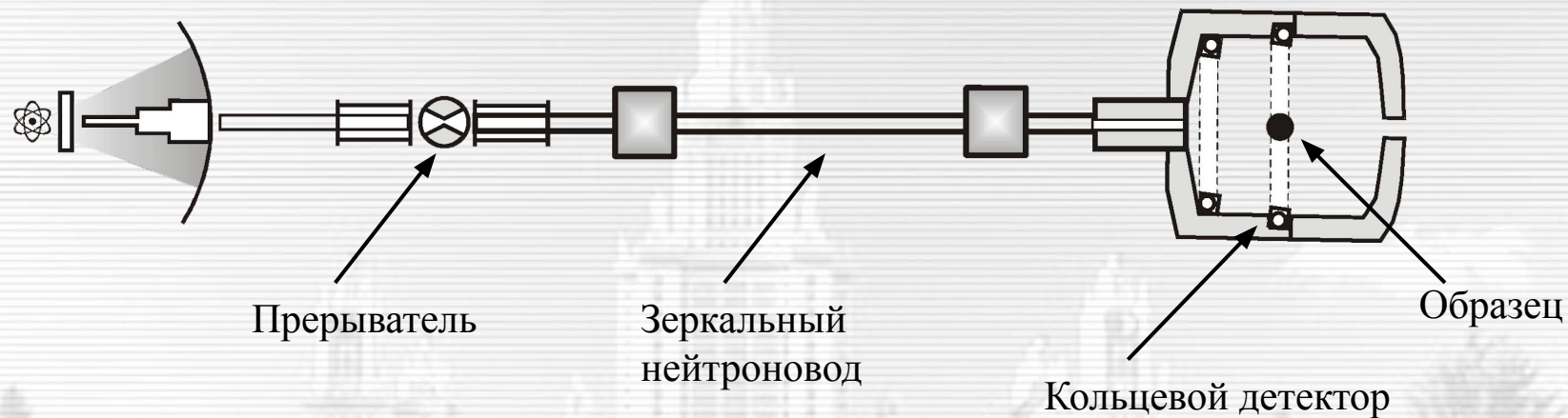


Рис. 7-12. Схема спектрометра для микрообразцов на реакторе ИБР-2 (вверху) и устройство кольцевого многоэлементного детектора (слева). Элементы детектора выполняются из сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$ с использованием условия временной фокусировки.

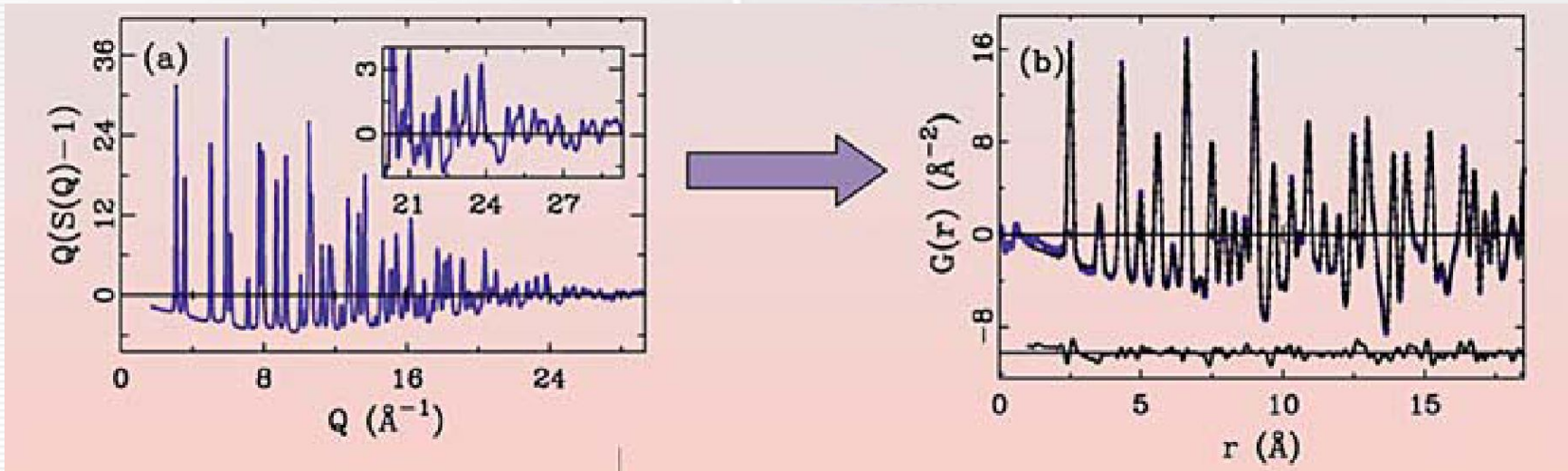


Рис. 7-13. Приведенный структурный фактор $F(Q)$ кристаллического Ni, измеренный до $Q_{\max} \approx 30 \text{ \AA}^{-1}$ (слева). На вставке показана область больших Q , где видны дифракционные пики, которые необходимо учитывать при вычислении преобразования Фурье. Справа показаны экспериментальная (точки) функция $G(r)$, полученная фурье-преобразованием $F(Q)$, и вычисленная (гладкая кривая) по структурной модели функция PDF. Внизу показана разностная кривая.

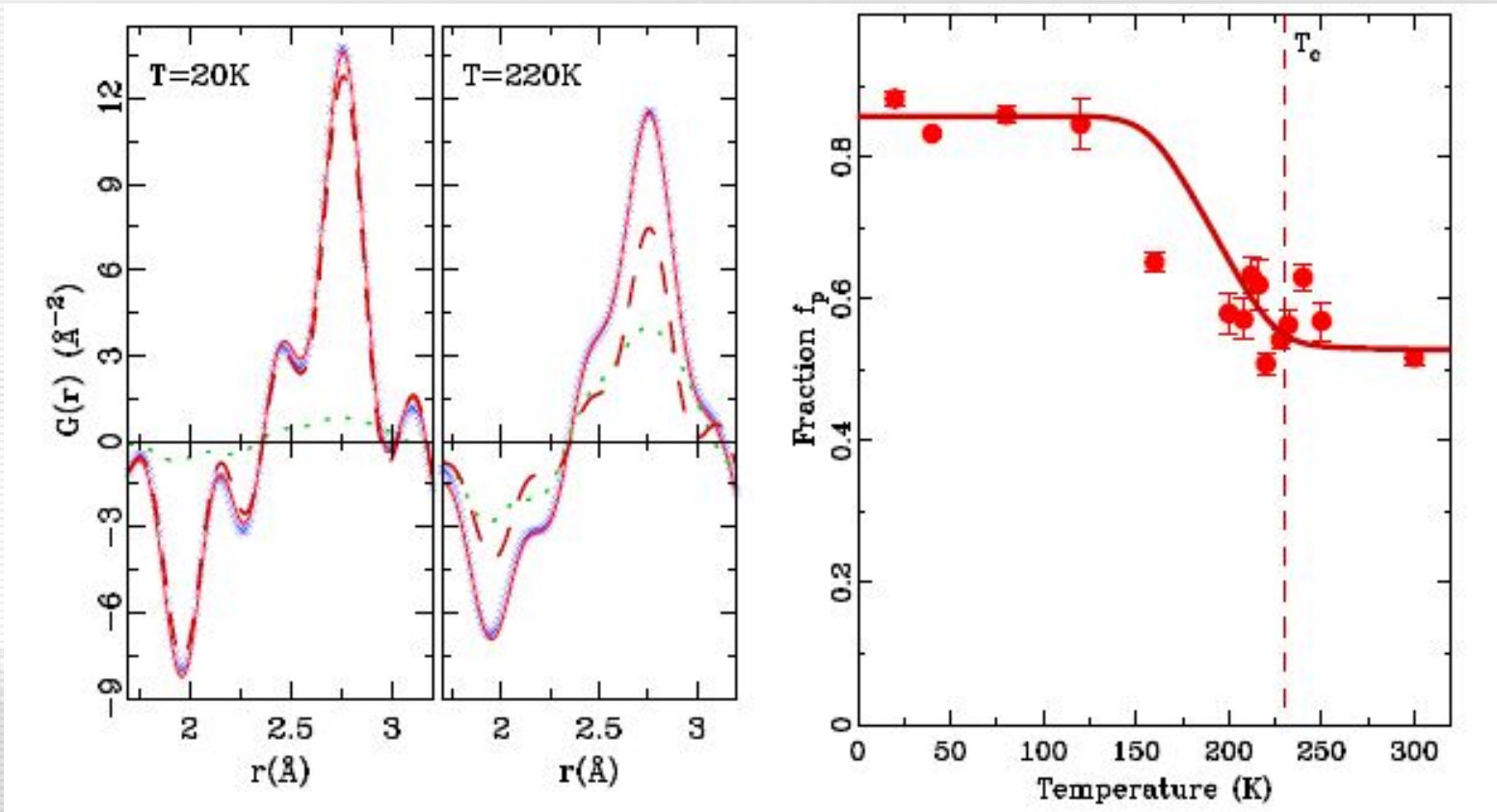


Рис. 7-14. Экспериментальная и вычисленные функции $G(r)$ в области малых r для $\text{La}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{MnO}_3$. Вычисления проведены для двухфазной модели (сплошная линия), предполагающей наличие в образце искаженной фазы (точки) и регулярной фазы (пунктир). При низкой температуре (20 К) доминирует регулярная фаза, при 220 К присутствуют обе фазы. Слева показано поведение доли регулярной фазы.

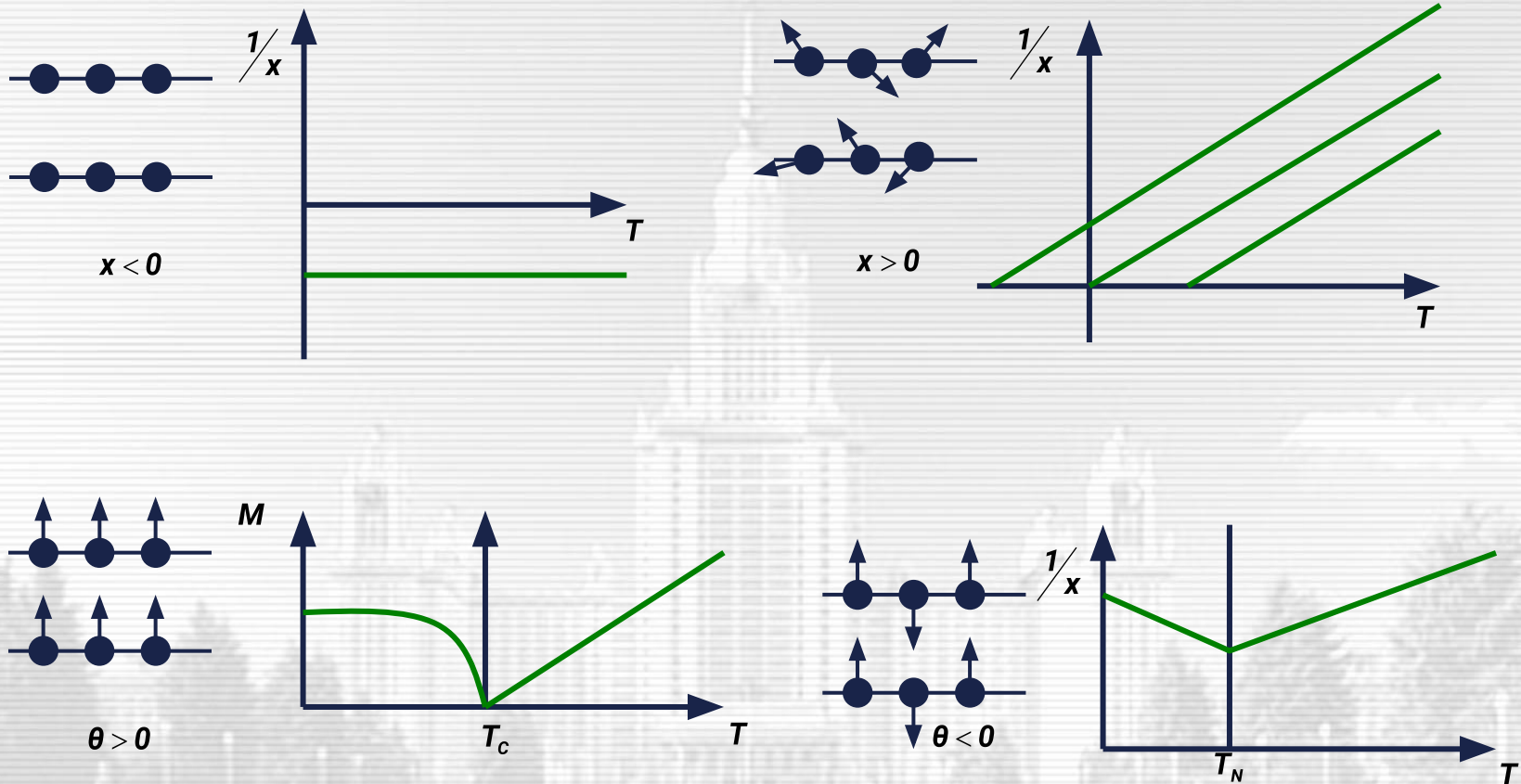


Рис. 8-1. Некоторые типы магнитных структур. Показаны диа-, пара-, ферро- и антиферромагнитная структуры и характерные температурные зависимости магнитной восприимчивости. Для ферромагнетика показано еще поведение намагниченности.

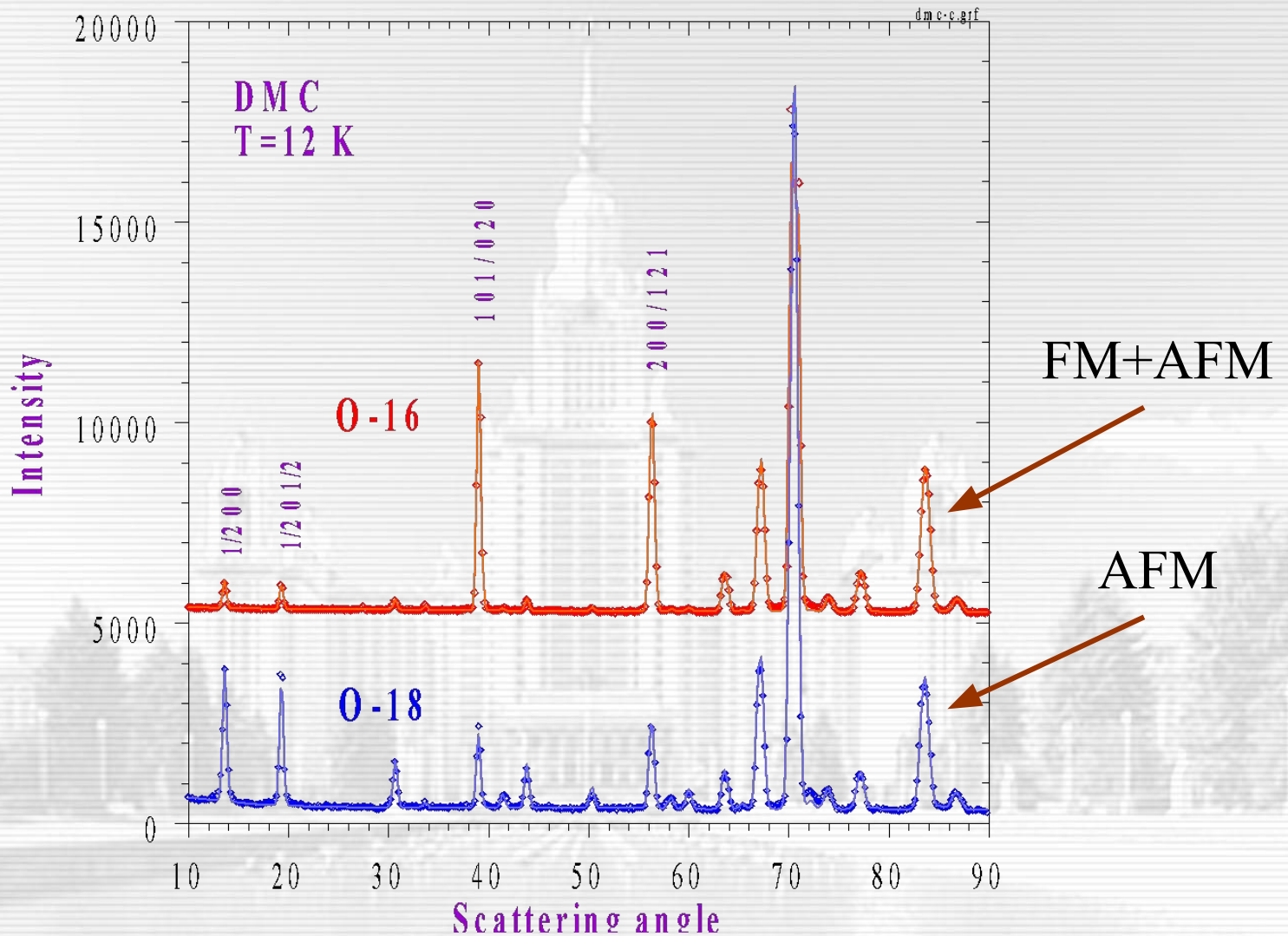


Рис. 8-2. Дифракционные спектры, измеренные при 12 К на λ_0 -дифрактометре DMC (SINQ) на составах $(\text{La}_{0.25}\text{Pr}_{0.75})_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LPCM-75), обогащенных изотопами кислорода ^{16}O (верхний) и ^{18}O (нижний). Состав с ^{18}O находится в AFM фазе, видны интенсивные пики с полуцелыми индексами. Состав с ^{16}O находится в смешанном состоянии.

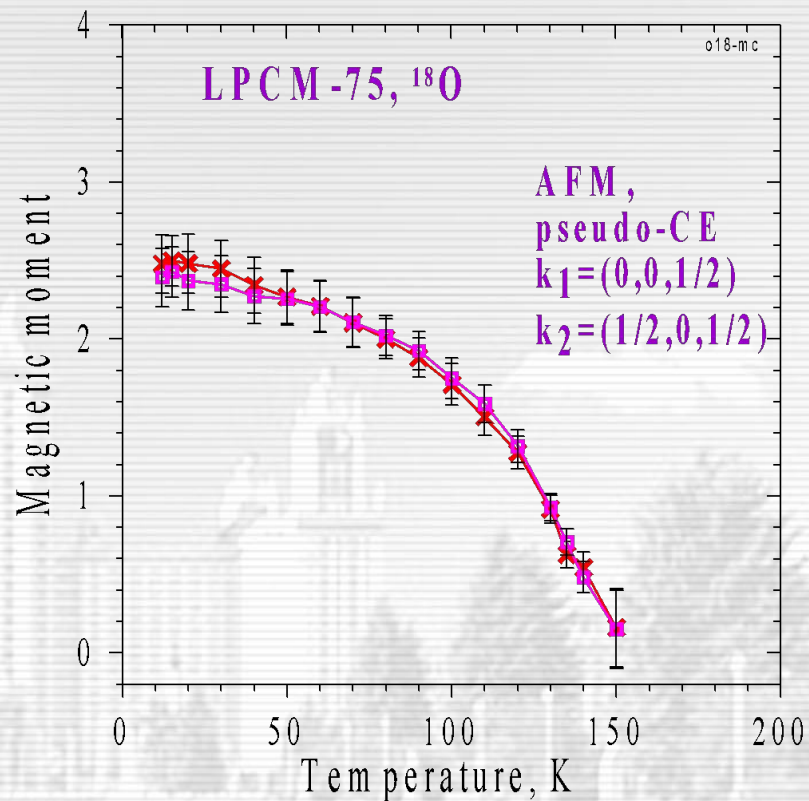
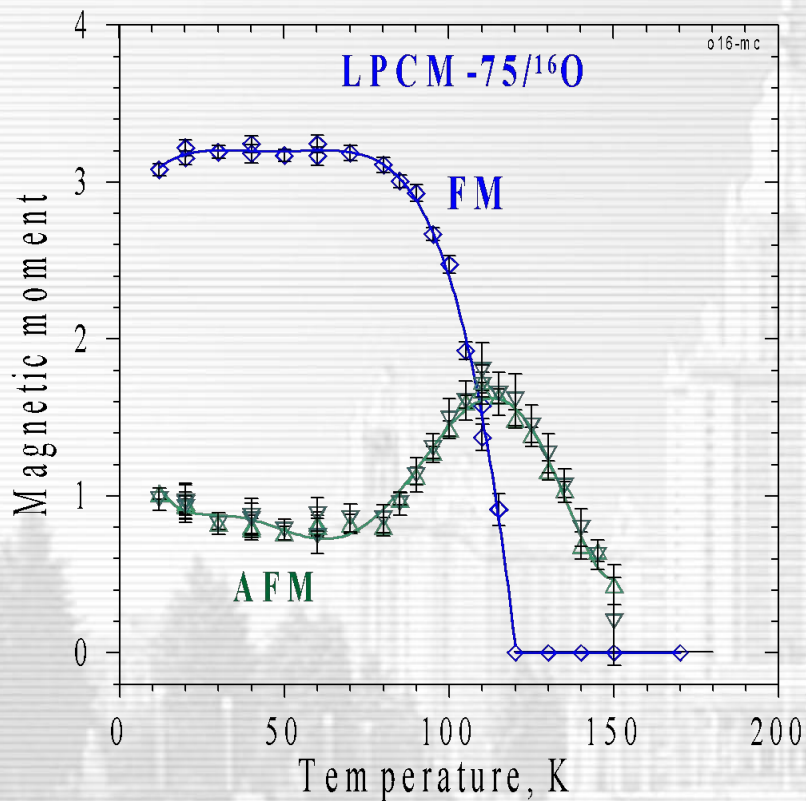


Рис. 8-3. Зависимости от температуры магнитных моментов (в магнетонах Бора) для составов LPCM-75, обогащенных изотопами ^{16}O (слева) и ^{18}O (справа) в FM и AFM фазах. AFM фаза типа псевдо-СЕ имеет два вектора распространения $(0\ 0\ 1/2)$ и $(1/2\ 0\ 1/2)$, магнитные моменты для которых совпадают в пределах экспериментальных ошибок. Моменты в FM фазе направлены в плоскости (ac) , моменты в AFM фазе – вдоль оси b .

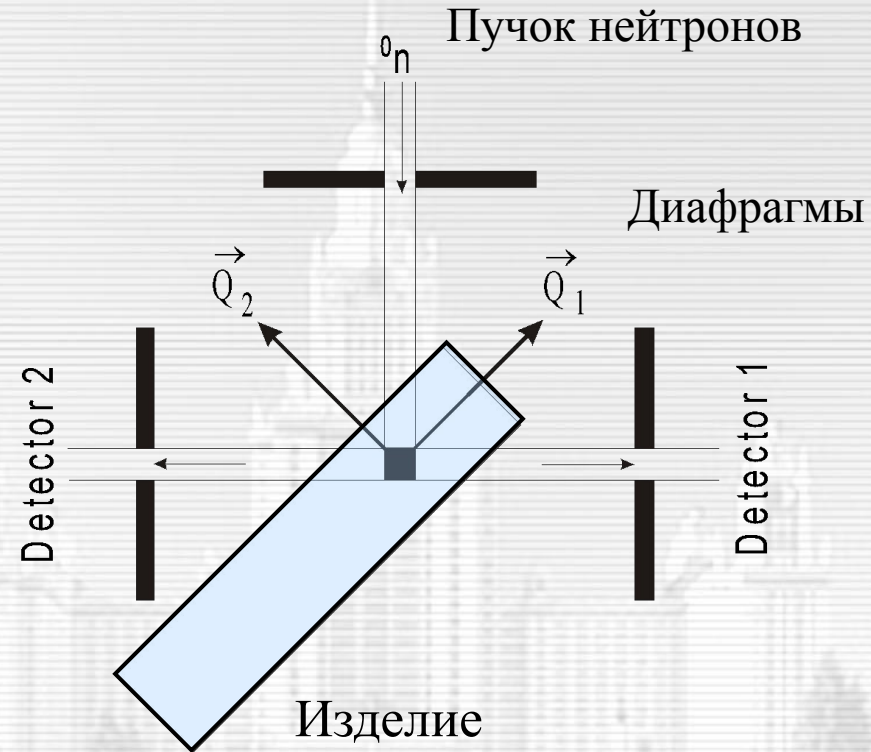


Рис. 9-1. Постановка эксперимента по измерению внутренних напряжений в объемном материале или изделии. Малый объем в изделии (gauge volume) выделяется с помощью диафрагм в первичном пучке нейтронов (вверху) и перед детекторами. Регистрация нейтронограмм двумя детекторами позволяет одновременно определять деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях Q_1 и Q_2 .

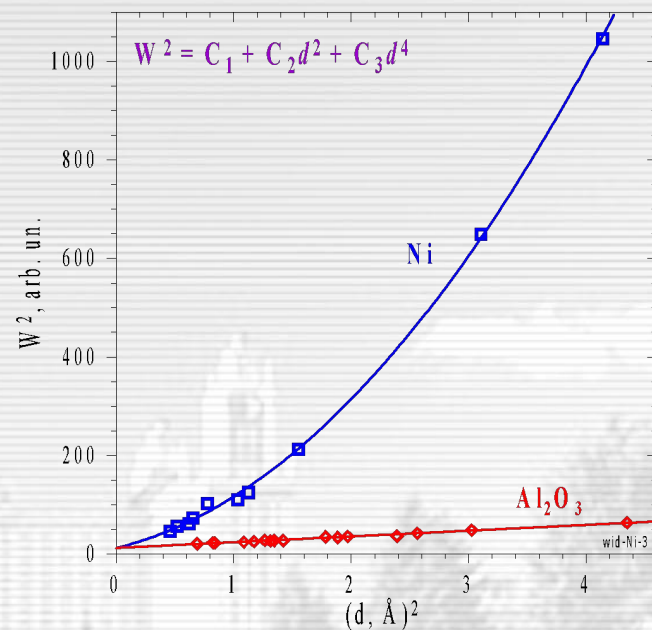
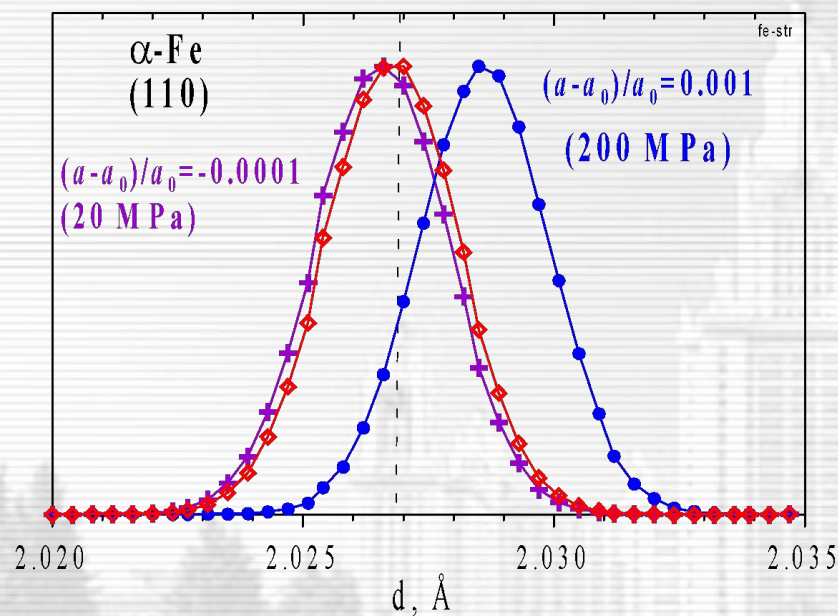


Рис. 9-2. Дифракционный пик (110) (слева) от недеформированного α -Fe ($d \approx 2.027 \text{ \AA}$), имеющего модуль Юнга $E = 200 \text{ ГПа}$ и его сдвиг при нагрузке 20 МПа (налево) и 200 МПа (направо). Разрешение дифрактометра, на котором проведено измерение пиков, $R \approx 0.001$. Зависимость ширины (справа) дифракционных пиков, измеренных на ТОF-дифрактометре, от d^2 . Точки, полученные для Al_2O_3 , соответствуют поведению функции разрешения дифрактометра ($R \approx 0.001$). В ширину пиков от мелкокристаллического порошка Ni вносят вклад дисперсия параметра решетки и малый размер кристаллитов.

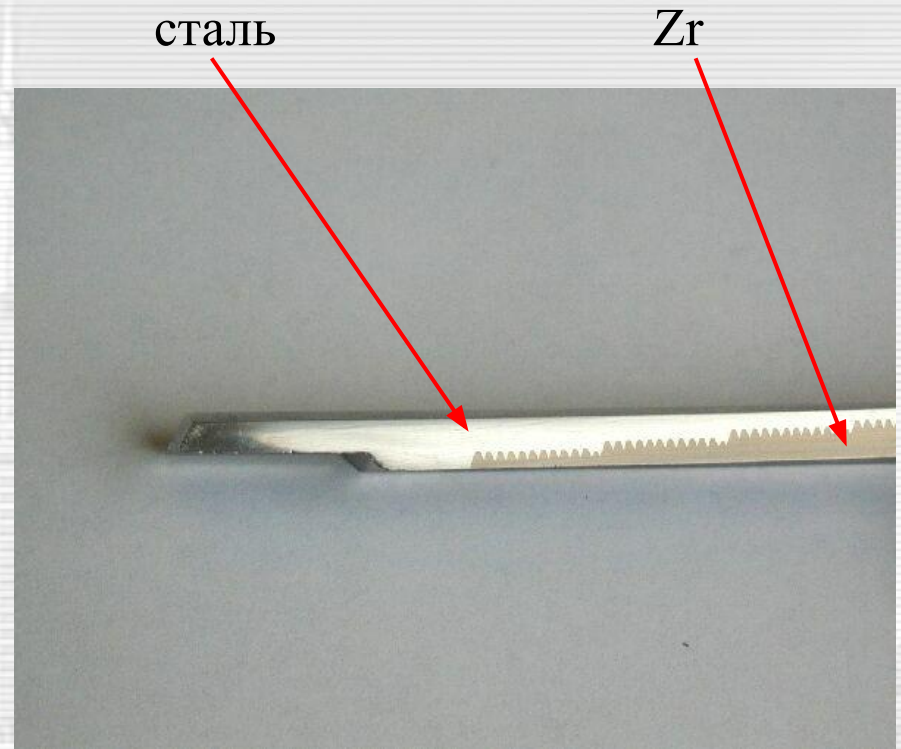
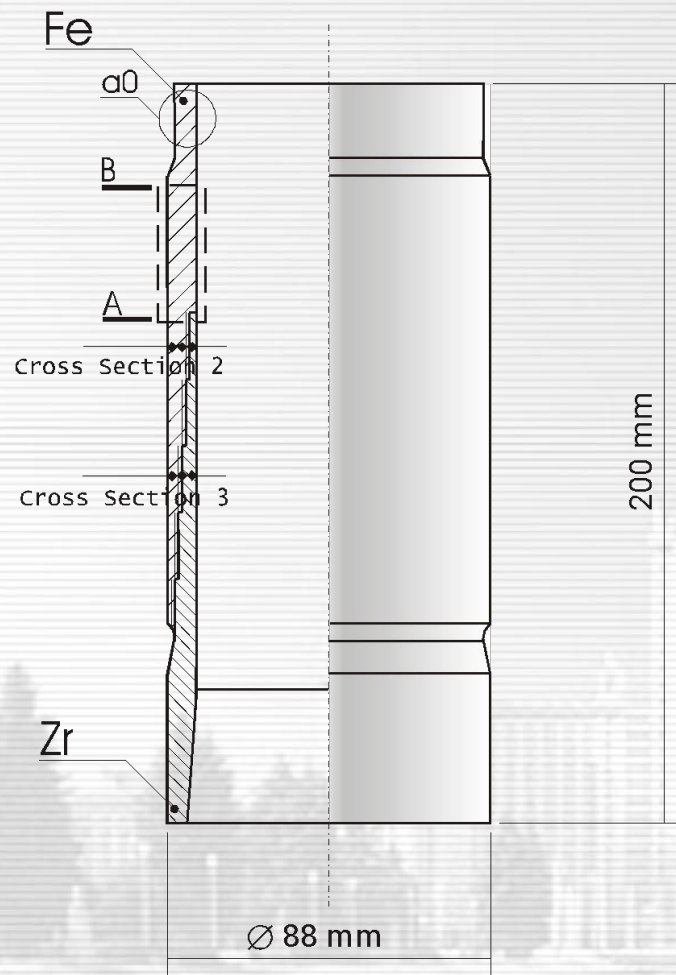


Рис. 9-3. Биметаллический переходник сталь – сплав циркония. Показаны область А-В и сечения 1, 2 (слева), в которых производились нейтронные измерения остаточных деформаций, a_0 – место, где был измерен параметр решетки стали, принятый за исходное значение. Справа показана стенка биметаллического переходника в разрезе. Виден переход от стали к Zr.

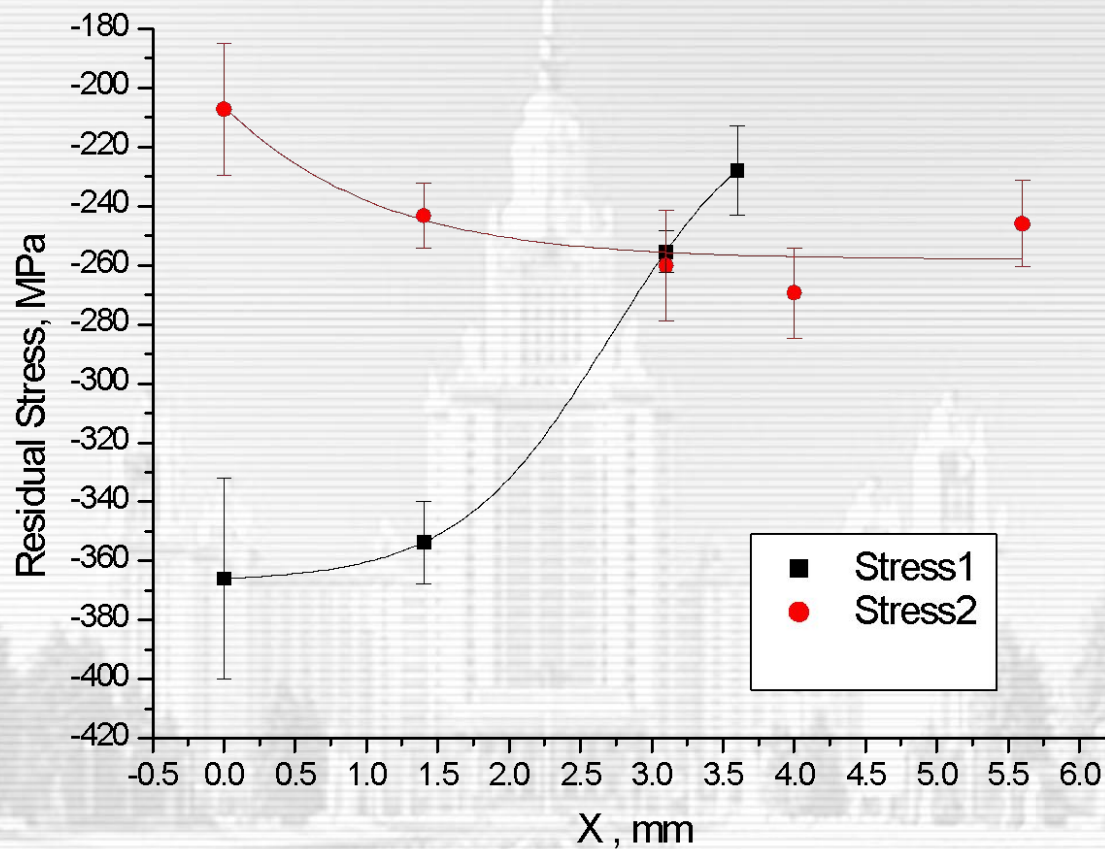


Рис. 9-4. Величины радиальных остаточных напряжений в сечении 3 (черные квадраты) и сечении 2 (красные кружки) биметаллического переходника. Координата x соответствует расстоянию от границы раздела нержавеющей стали – цирконий ($x = 0$ – граница раздела).

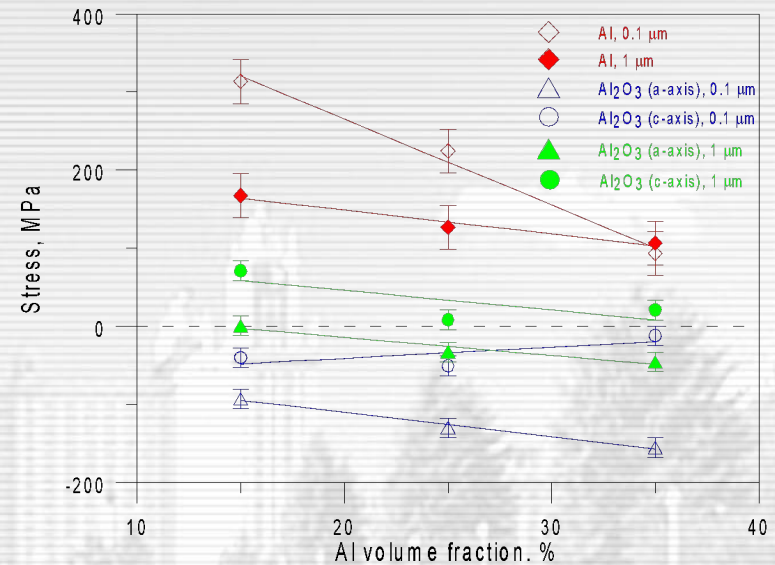
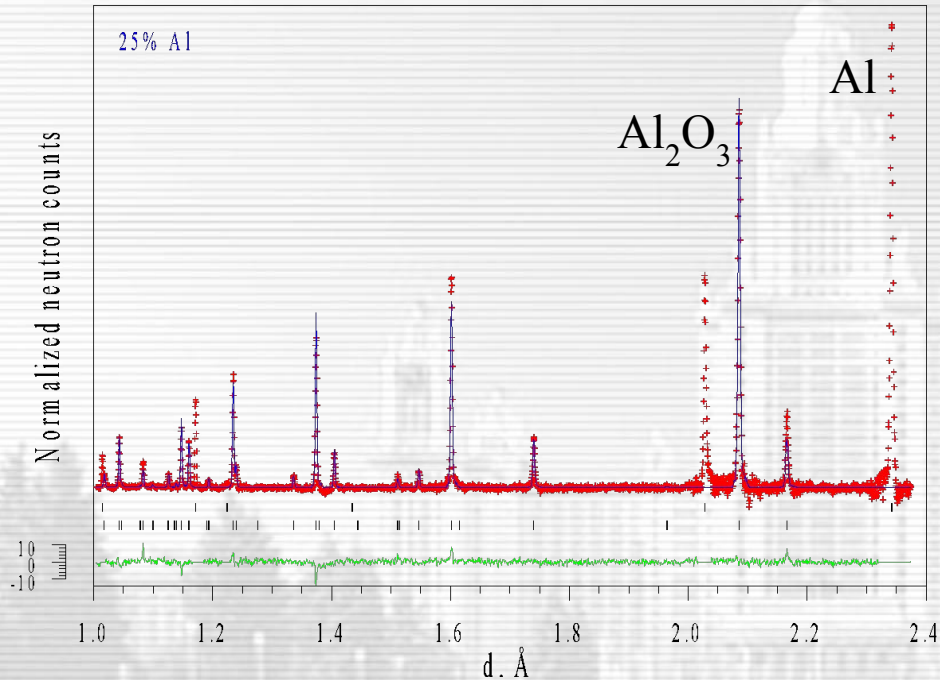


Рис. 9-5. Дифракционные спектры (слева) от композита $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ с объемной долей металлической фазы Al 25% и средним размером металлических включений 1 мкм. Штрихами указаны (сверху вниз) рассчитанные положения дифракционных пиков для фаз Al и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, соответственно. Рефлексы текстурированной Al фазы в профильную обработку не включались. Справа показаны остаточные напряжения в композите $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ в зависимости от объемной доли и среднего размера металлических включений Al.