

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА

В. Глезер

ЦЕНТР ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, КАРЛСРУЭ, ФРГ

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматривается один из путей усовершенствования метода нейтронной спектроскопии по времени пролета. Это усовершенствование связано с применением корреляционных прерывателей, которые позволяют более полно использовать интенсивность нейтронных пучков реакторов непрерывного действия. Излагается принцип действия корреляционных прерывателей и рассказывается об экспериментах, в которых преимущество корреляционных методов по времени пролета перед обычными проявляется наиболее полно. В заключение указываются перспективы дальнейшего развития корреляционной техники.

A B S T R A C T

A way of improving the time-of-flight neutron spectrometry technique is considered. This improvement is based on the application of correlation choppers which permit the intensity of the neutron beams of stationary reactors to be more fully used. The principle of operation of these choppers is described and the experiments which showed most clearly the advantage of the correlation time-of-flight methods over the conventional techniques are discussed. In conclusion, the perspectives of the future development of the correlation technique are indicated.

ВВЕДЕНИЕ

Нет сомнения в том, что импульсные реакторы чрезвычайно перспективны. Об этом свидетельствуют интересные и многообещающие эксперименты, проводимые на импульсном реакторе быстрых нейтронов (ИБР) в г. Дубне. Однако в настоящее время имеется несколько реакторов непрерывного действия с потоком 10^{15} нейтрон/(см²·сек), и интересно выяснить, могут они конкурировать с более совершенными импульсными реакторами или нет. Сравнить их во всех аспектах довольно сложно. Наиболее естественно это сделать в экспериментах, использующих методы времени пролета. Однако интересно не только сравнить, но и подумать над тем, нельзя ли усовершенствовать методы времени пролета на стационарных реакторах. Этому вопросу и посвящена данная статья.

Как известно, имеется два основных метода определения энергии в экспериментах по рассеянию медленных нейтронов, а именно методы дифракции и времени пролета. Последняя методика позволяет измерять сразу много параметров с меньшими усилиями, чем в методах дифракции. Однако наряду с этим преимуществом имеется и недостаток. Непрерывный пучок из реактора приходится разбивать на импульсы с очень большой скважностью, чтобы не было перекрывания событий, происходящих во время соседних импульсов. В результате сильно понижается интенсивность. Поэтому на стационарных реакторах, особенно в тех случаях, когда интересуются небольшим числом заранее заданных передач энергии и импульса, как, например, в фононных экспериментах, методы дифракции оказываются предпочтительнее. Только совсем недавно специалисты в области нейтронной физики стали задумываться над тем, нельзя ли рабочий цикл* в методах времени пролета выбирать более оптимально. Было выяснено, что часть из не используемых ранее нейтронов можно сделать полезной, если усовершенствовать старый метод времени пролета. Идея, лежащая в основе усовершенствования, оказалась новой только для нейтронной физики. Она давно применялась в технике связи и других областях науки. Однако должно пройти какое-то время, прежде чем в ее плодотворности удастся убедить большое число нейтронных физиков.

Обратимся к теории связи и будем называть спектр по времени пролета функцией отклика. Как показано на рис. 1, ее можно измерять в основном тремя методами. Первый метод состоит в том, что система возбуждается короткими импульсами и функция отклика

* Рабочий цикл — отношение полезного времени пучка в течение одного оборота прерывателя к периоду. — *Прим. перев.*

наблюдается непосредственно. При втором — система возбуждается синусоидальной волной и в результате получается компонента Фурье функции отклика. Наконец, систему можно возбуждать статистическим шумом, тогда функция отклика получается из измерения кросс-корреляции между входным и выходным сигналами. Для нейтронной физики можно применять как второй, так и третий методы, но я сосредоточу свое внимание на корреляционном.

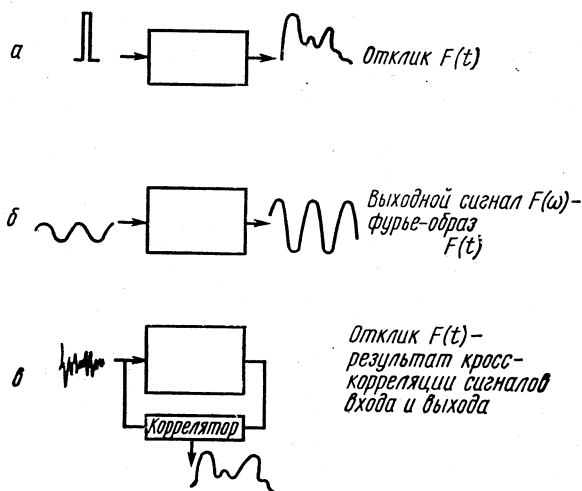


Рис. 1. Методы определения функции отклика системы:

a — непосредственное измерение функции отклика $F(t)$ при возбуждении импульсом; *b* — измерение Фурье-образа $F(\omega)$ отклика $F(t)$ при синусоидальном возбуждении; *c* — измерение $F(t)$ по кросс-корреляции входного сигнала с выходным при возбуждении шумом.

Добиться истинно статистической модуляции нейтронного пучка на практике довольно трудно, да это и не нужно, поскольку бесконечные времена корреляции никогда не требуются. Гораздо удобнее пользоваться такой модуляцией, которая с одной стороны случайная, а с другой — периодическая во времени. Примером тому являются так называемые псевдослучайные бинарные последовательности. Короткая последовательность этого типа показана на рис. 2. На практике используются циклы гораздо большей длительности. Автокорреляционная функция такой последовательности очень близка к функции разрешения обычного импульсного источника нейтронов, имеющего тот же самый период.

Вместо того чтобы углубляться в математический формализм, лучше основную идею извлечения функции отклика из кросс-корреляции сигналов проиллюстрировать с помощью рис. 3. В обычном методе времени пролета после каждого входного импульса получаем ответный импульс, который после обработки на многоканальном анализаторе дает полный интересующий нас спектр.

Если последовательность входящих импульсов случайна, то найти кросс-корреляцию означает найти всевозможные корреляции между входом и выходом. Те корреляции, которые имеют отношение к действительности, будут накапливаться, как и в обычном

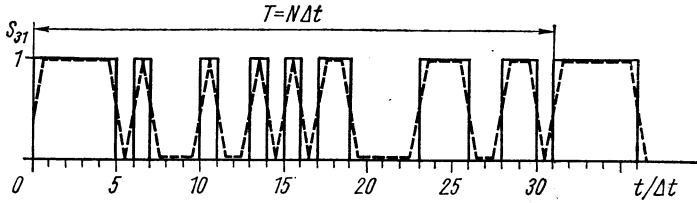


Рис. 2. Псевдослучайная последовательность $S(t)$ для $N = 31$.

эксперименте, ложные же будут давать постоянный фон, поскольку функция сигнала обладает случайными свойствами.

Уже из этого можно заключить, что колоссальный выигрыш в интенсивности, который получается при переходе от рабочего цикла

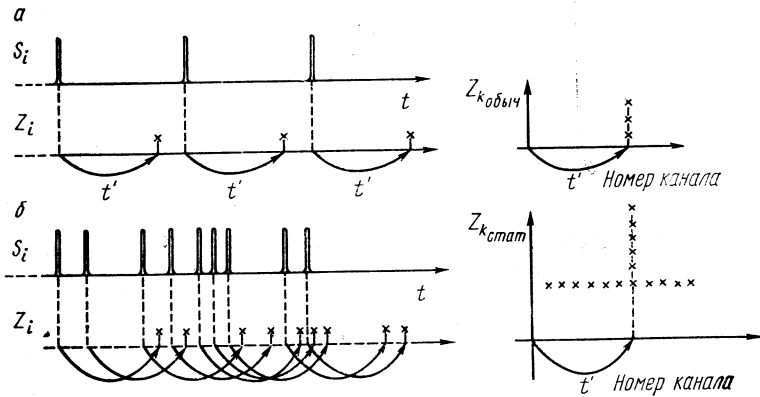


Рис. 3. Определение спектра по времени пролета:
 а — обычными методами; б — статистическими; S_i — входной сигнал; Z_i — выходной сигнал; Z_k — спектр по времени пролета.

менее 0,01 к рабочему циклу 0,5, не приводит к столь же большому росту полезного сигнала, поскольку неизбежно присутствие ложных корреляций. В корреляционном методе с рабочим циклом 0,5 статистическая ошибка оказывается одинаковой для всех каналов, и она определяется полным числом отсчетов. Чтобы получить количественные оценки выигрыша в информации в реальном случае, необходимо рассмотреть конкретный эксперимент.

Абсолютная статистическая погрешность в обычном методе времени пролета

$$\Delta F_k = [F_k + 2U]^{1/2},$$

где F_k — число событий в канале k ; U — фон; с другой стороны, в корреляционном методе она за то же самое время измерения будет иной:

$$\Delta F_k = \left[\frac{2}{N+1} \overline{S_i^2} (F_{tot} + 4U) \right]^{1/2}, \quad N \gg 1,$$

где F_{tot} — полное число отсчетов функции отклика (в спектре); $\overline{S_i^2}$ — среднее квадрата функции входного сигнала. Корреляцион-



Рис. 4. Области применимости обычных и корреляционных методов.

ный метод можно считать выгоднее, если

$$\left(\frac{\Delta F_k}{F_k} \right)_{\text{псевдосл}} < \left(\frac{\Delta F_k}{F_k} \right)_{\text{обыч}}$$

или

$$F_k > 2\overline{F} - 2U; \quad \overline{F} = F_{tot}/N.$$

На рис. 4 показаны области, где выгодны корреляционный и обычный методы. Эти области разграничиваются прямой $F_k/\overline{F} = 2(1 - U/\overline{F})$.

Подобным же образом можно вычислить и выигрыш во времени при одинаковой статистической точности:

$$G = \left(\frac{\Delta F_k}{F_k} \right)_{\text{обыч}}^2 / \left(\frac{\Delta F_k}{F_k} \right)_{\text{псевдосл}}^2 = \frac{N+1}{2} \frac{F_k + 2U}{N\overline{F} + 4U};$$

$$\overline{F} = F_{tot}/N; \quad G \approx \frac{N}{4} \quad \text{при} \quad \frac{U}{\overline{F}} > N.$$

Для цикла длиной $N = 127$ этот выигрыш при различных условиях демонстрируется на рис. 5. Условия, при которых корреляционные методы имеют преимущество, перед обычными методами очевидны.

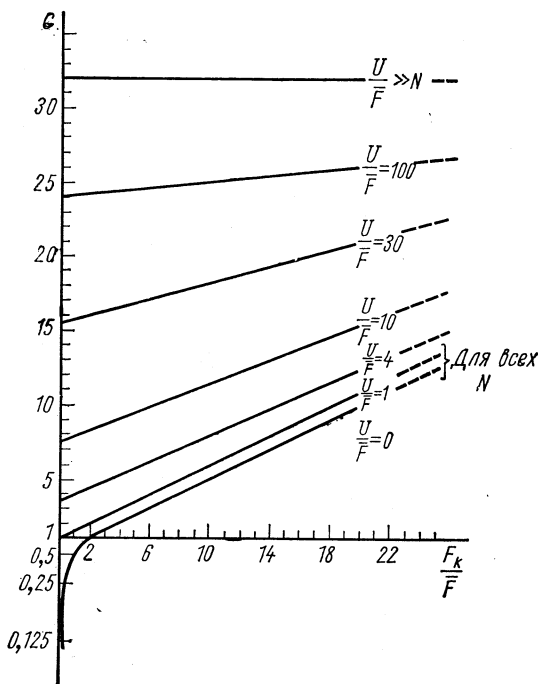


Рис. 5. Выигрыш во времени корреляционного метода времени пролета.

Преимущества имеются в экспериментах: 1) с высоким некоррелированным фоном; 2) при поисках резонансов; 3) когда ищутся резонансы и имеется высокий некоррелированный фон.

1. ПРОВЕРКА ДОСТОИНСТВА КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА НА ПРАКТИКЕ

Короткое обсуждение принципов корреляционной методики мне бы хотелось дополнить некоторыми практическими результатами. Впервые псевдослучайная модуляция нейтронного пучка методом времени пролета в экспериментах была осуществлена независимо друг от друга группами в Будапеште, Аргонне и Карлсруэ в 1968 г. В последних двух применялись механические прерыватели. Поскольку мне лучше всего известны эксперименты в Карлсруэ, то именно на них здесь остановлюсь. На рис. 6 показана схема уста-

новки на реакторе, который дает поток всего $1 \cdot 10^{13}$ нейтрон/(см² · сек). Эксперимент был задуман для фононных измерений в монокристаллах и одновременно для измерений дифракции на порошках, хотя до сих пор он в основном использовался для фононных измерений.

Прерыватель, дающий псевдослучайную последовательность импульсов, приведен на рис. 7. Он состоит из алюминиевого диска

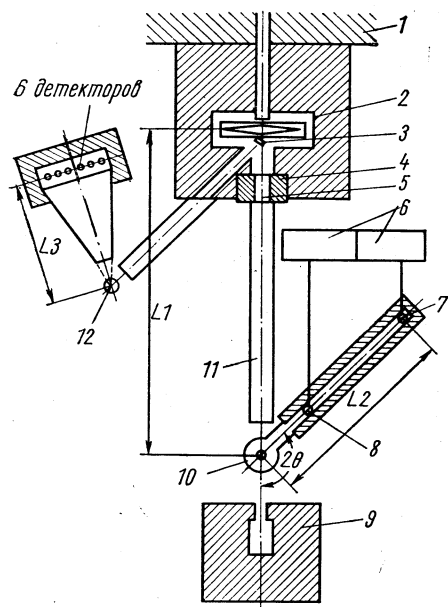


Рис. 6. Схема экспериментальной установки с прерывателем на реакторе FR-2: 1 — защита реактора; 2 — корреляционный прерыватель; 3 — кристалл; 4 — криостат; 5 — фильтр; 6 — временной анализатор; 7 — II детектор; 8 — I детектор; 9 — ловушка ионов; 10 — держатель для образца; 11 — нейтроновод; 12 — монокристалл.

диаметром 50 см, вращающегося со скоростью 200 м/сек на ободе. Хотя установка довольно консервативна и не оптимальна в техническом отношении, мы пользовались ею, чтобы продемонстрировать достоинства корреляционной техники в различных приложениях.

Типичные результаты по фононным измерениям в золоте приведены на рис. 8. Сечение поглощения золота составляет 97 барн. Длинный вертикальный отрезок указывает погрешность, которую мы имели бы при обычном методе времени пролета, извлекая ту же самую информацию. Эта погрешность связана главным образом с некоррелированным фоном. И ясно видно, что эксперимент нельзя было бы считать удавшимся. Фононные кривые золота, измеренные указанным способом, приведены на рис. 9.

Результаты корреляционного эксперимента для серебра приведены на рис. 10. Поглощение и фон здесь были такие же, как и в предыдущем случае. Результаты находятся в хорошем согласии с измерениями Брокхауза, произведенными на лучшем реакторе и за более длительное время.

На рис. 11 и 12 приведены фононные дисперсионные кривые D₂O. Здесь нет трудностей, связанных с поглощением, и все же методика имеет преимущество, поскольку отношение максимума интенсивности к средней составляет 4—5.

Первые результаты в фононном эксперименте, проводящемся сейчас на CsBr, приведены на рис. 13. Здесь преимущество также

связано с большим отношением максимума к среднему, причем это отношение оказывается слегка выше, чем в случае D_2O .

С помощью указанной установки были выполнены не только фононные эксперименты. Одним из самых интересных экспериментов по неупругому рассеянию были поиски тонкой структуры в пара-, орто-переходах в твердом водороде, возникающей в результате квадрупольно-квадрупольных взаимодействий орто-молекул. Молекулярное вращение затормаживается этим взаимодействием. В результате, как было установлено в предшествующих экспериментах,

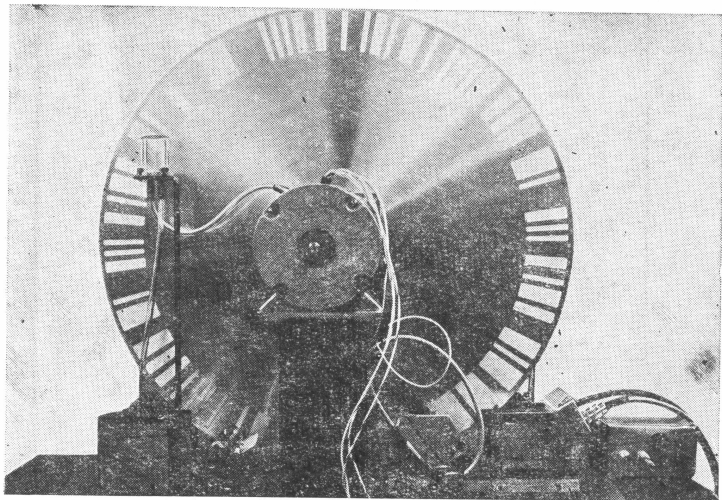


Рис. 7. Корреляционный прерыватель.

ротационная линия по мере увеличения орто-концентрации уширяется. При низких орто-концентрациях должно наблюдаться расщепление линии, возникающее из-за взаимодействия пар орто-молекул. Поэтому для эксперимента была приготовлена смесь, содержащая 4% орто-водорода. Изолированными парами расположились 23% орто-молекул. Результаты представлены на рис. 14. Энергия падающих нейтронов была 19,2 мэв, а разрешение по энергии 0,6% или 100 мкэв. Кроме несмещенного перехода при энергии 14,6 мэв наблюдалось еще два крошечных пика. Из них можно определить параметр взаимодействия Γ , который получился равным 70 мкэв.

На рис. 15 приведен упругий спектр в кадмии, измеренный Скольдом в Аргонне. Корреляционная методика обладает также достоинствами и в структурных исследованиях, о чем свидетельствуют рис. 16 и рис. 17.

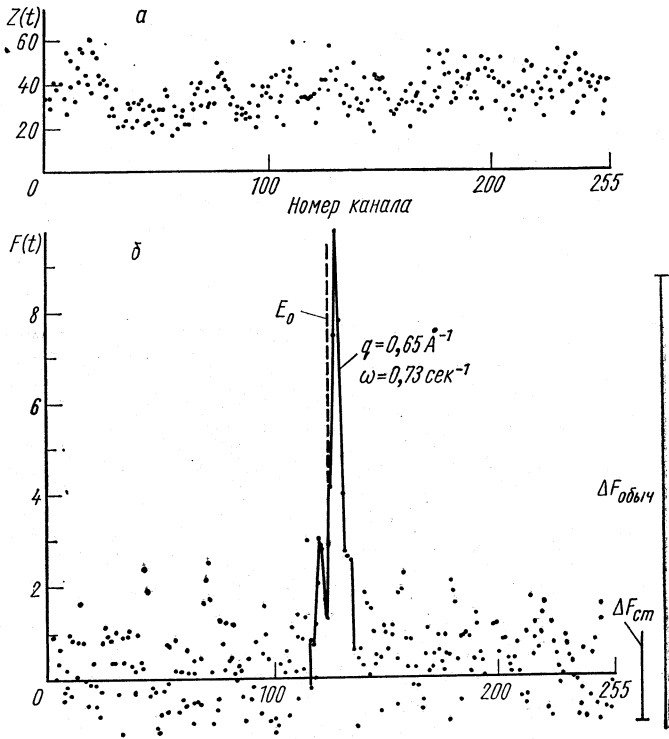


Рис. 8. Спектр золота, полученный методом времени пролета:
 а — некоррелированный псевдослучайный спектр; б — спектр после кросс-корреляции с входным сигналом.

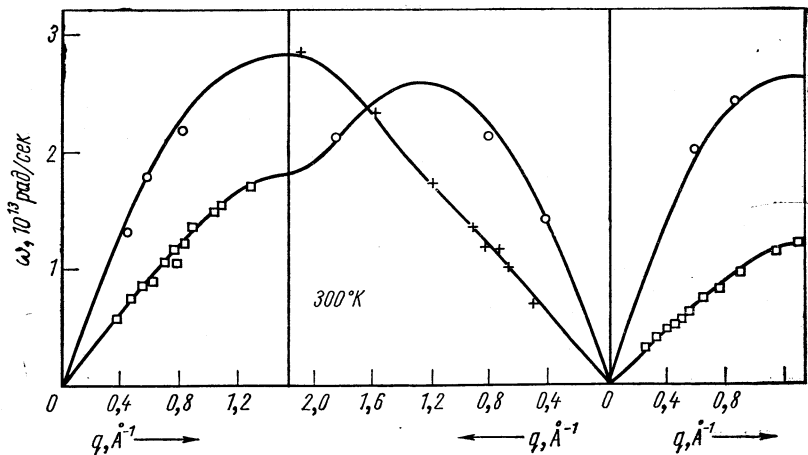


Рис. 9. Дисперсионные кривые для золота, полученные корреляционным методом.

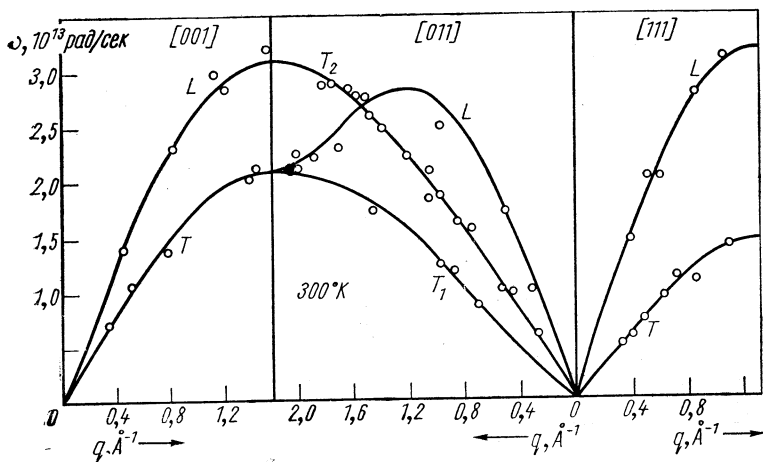


Рис. 10. Дисперсионные кривые для серебра, полученные корреляционным методом.

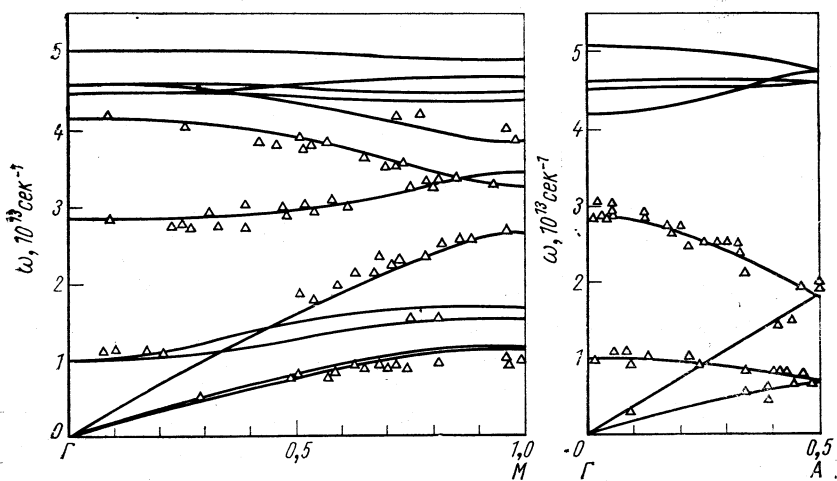


Рис. 11. Дисперсионные кривые для D_2O .

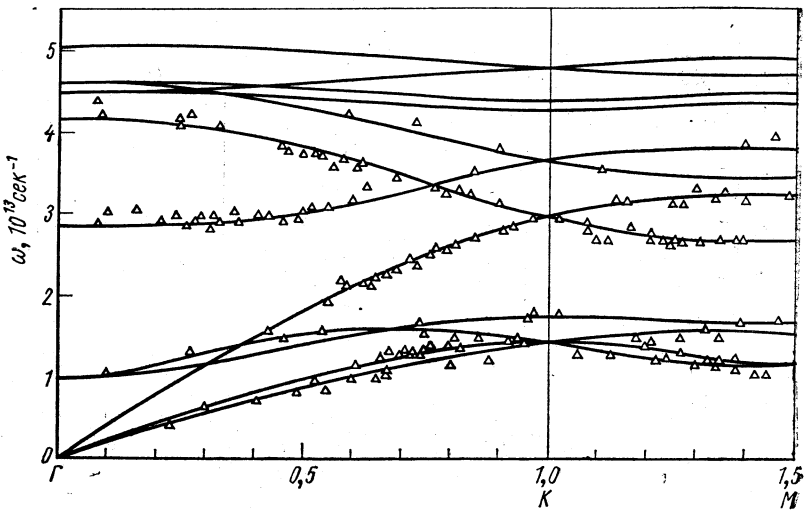


Рис. 12. Дисперсионные кривые для D_2O .

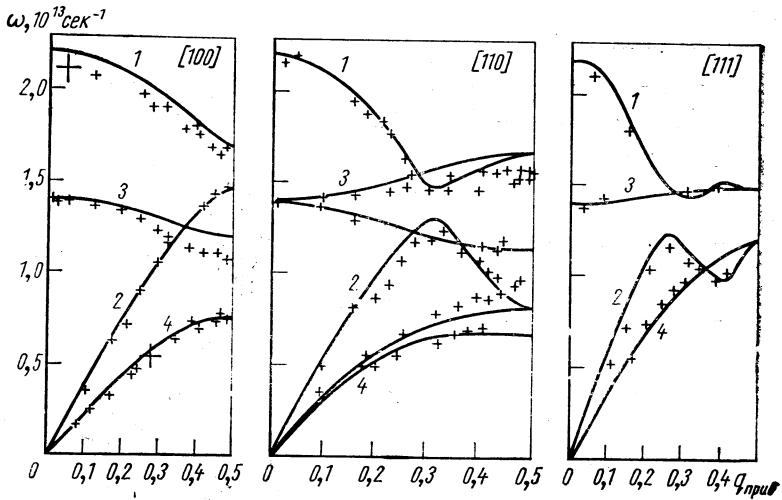


Рис. 13. Дисперсионные кривые для $CsBr$ при температуре $300^\circ K$:

1 — продольная оптическая ветвь; 2 — продольная акустическая ветвь; 3 — поперечная акустическая ветвь.

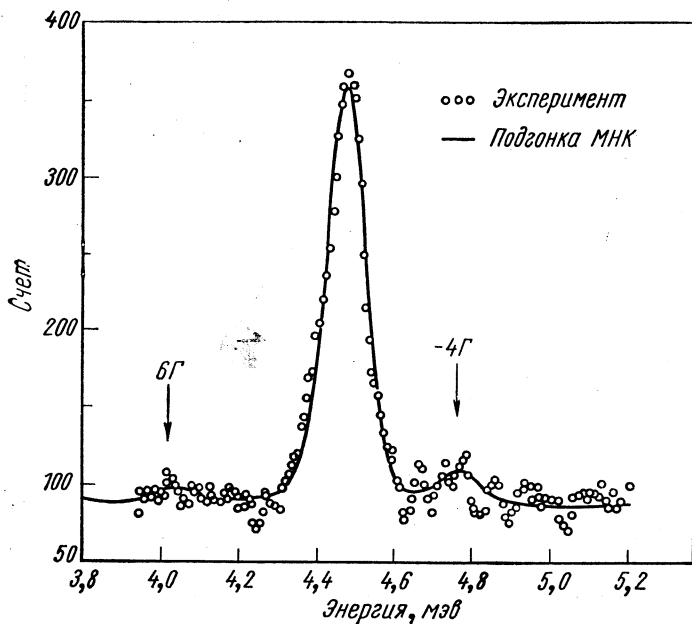


Рис. 14. Сверхтонкое расщепление орто-, пара-перехода в твердом водороде. Рядом с центральным пиком видны два боковых.

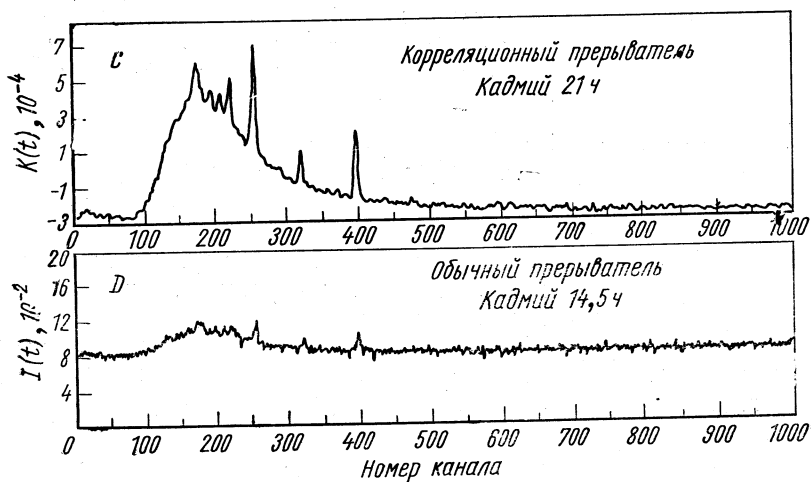


Рис. 15. Измерения упругого спектра в кадмии с помощью корреляционного и обычного прерывателей. В корреляционном методе видны хорошо разрешенные упругие пики.

Разрешение той части установки, которая работает на дифракционном принципе, дано на рис. 16. Эта часть уже собрана в настоящее время в Карлсруэ. Фрагмент дифракционной картины BiFeO_3 , подобной наблюдавшейся несколько лет назад в Дубне на импуль-

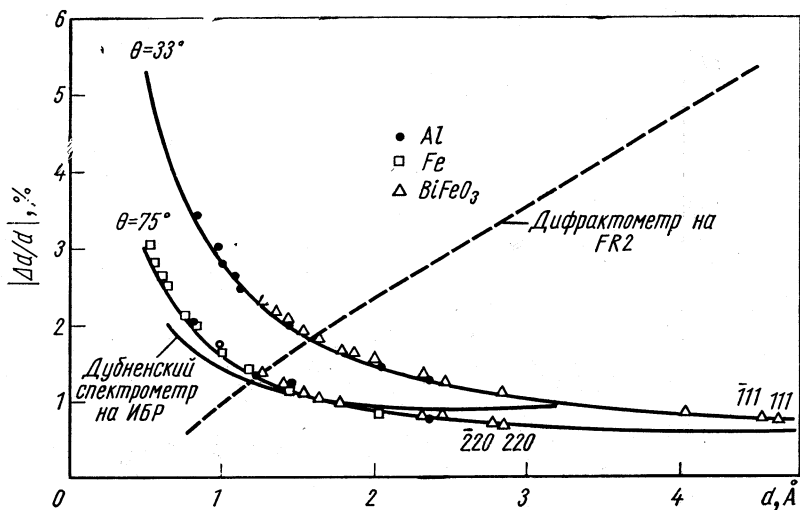


Рис. 16. Зависимость разрешения корреляционного метода времени пролета в дифракционных экспериментах от величины постоянной решетки и брэгговского угла.

сном реакторе, показан на рис. 17. Это — корреляционное измерение, и расщепление рефлекса $[220]$ свидетельствует о том, что предполагаемая небольшая ромбическая деформация действительно имеет место.

2. ПУТИ ВОЗМОЖНОГО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МЕТОДИКИ

Достоинства корреляционной методики в экспериментах по рассеянию нейтронов очевидны. Однако наша установка не является оптимальной в двух отношениях:

1) скорость корреляционного прерывателя на периферии, которая равна 200 м/сек, не меняется и ограничивает полезное сечение пучка излишне жестко. Увеличить скорость в 2—3 раза не представляет проблемы;

2) до сих пор рабочий цикл выбирался равным только 0,5. Однако более подробный анализ псевдослучайных последовательностей показал, что эта величина является оптимальной лишь для довольно больших некоррелированных фонов или высоких отношений максимума к среднему значению в измеряемой функции откли-

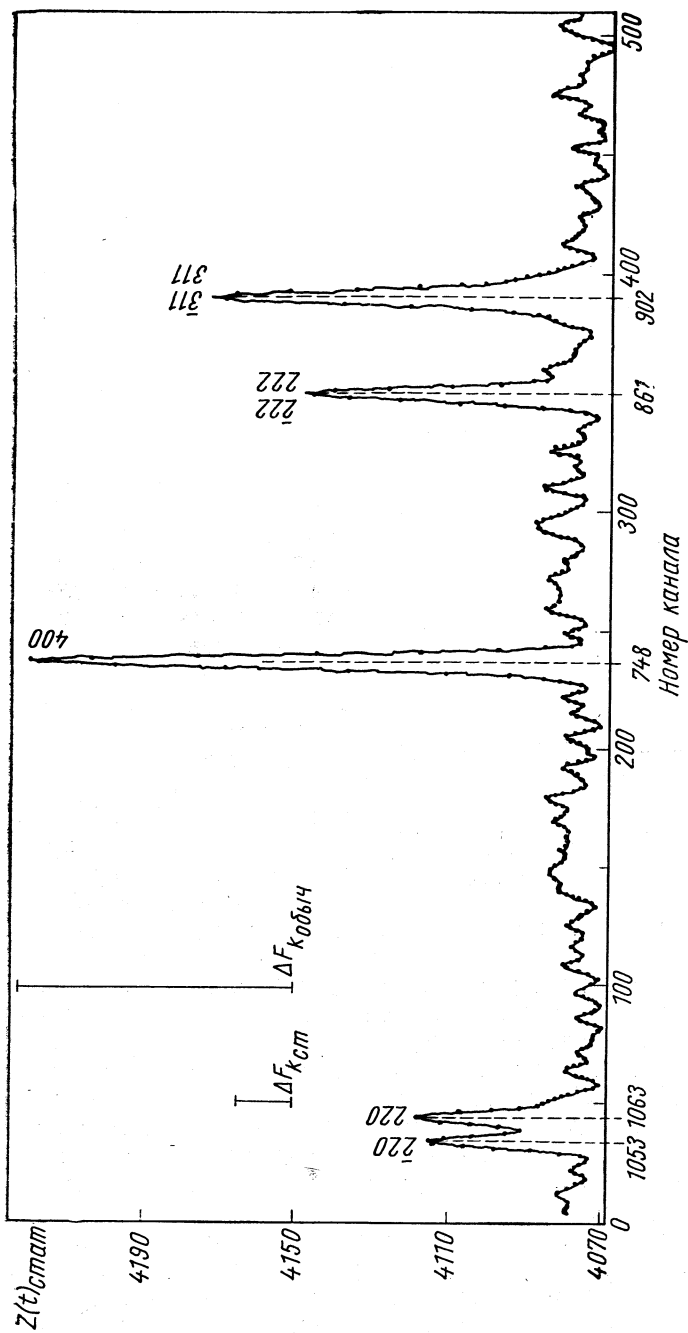


Рис. 17. Нейтроннограмма BiFeO_3 $l = 6$ м, $\theta = 150^\circ$, $t = 27$ ч, $G = 28,2$. Измерения производились с охлаждаемым Ве-фильтром.

ка. Для промежуточных случаев оптимальным является рабочий цикл менее 0,5. Для достаточно плоских или нерезонансных функций отклика можно легко рассчитать значения рабочих циклов для различных некоррелированных фонов. Результаты получаются следующие:

$\alpha = U/F_{tot}$	Оптимальный рабочий цикл
$1/2 < \alpha$	$1/2$
$1/10 < \alpha < 1/2$	$1/3$
$1/22 < \alpha < 1/10$	$1/4$
$1/46 < \alpha < 1/22$	$1/5$
$1/82 < \alpha < 1/46$	$1/7$

Более общие условия иллюстрируются следующими рисунками. Изменение области применимости корреляционной техники с изменением рабочего цикла показано на рис. 18.

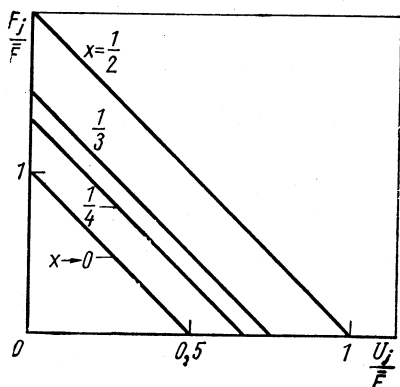


Рис. 18. Области применимости корреляционных прерывателей с различными рабочими циклами x .

Выигрыш в точности при различных рабочих циклах и разных отношениях сигнала и фона к среднему сигналу при условии, что псевдослучайная последовательность состоит из 100 каналов, дан на рис. 19. Выигрыш рассматривается по отношению к обычному прерывателю с рабочим циклом 0,01. Из рисунка видно, что если $\sigma > 1$, то всегда существуют прерыватели с псевдослучайной последовательностью, которые предпочтительнее обычных прерывателей.

Для довольно широкого класса экспериментов, по-видимому, оптимальным является рабочий цикл от 0,2 до 0,3.

Из всего сказанного можно сделать тот важный вывод, что корреляционный подход позволяет оптимизировать метод времени пролета при планировании экспериментов, например при решении задачи в несколько этапов. Механических дисков можно сделать несколько, так чтобы у них были различные рабочие циклы. Однако такой подход не очень гибок и не позволяет поставить оптимально несколько экспериментов на одной установке. Устранить этот недостаток тем не менее можно, и сейчас уже есть предположения, как это сделать.

Если требуется, чтобы импульсный пучок был монохроматичным, лучше пользоваться магнитными системами, чем механическими прерывателями. Однако имеющиеся в настоящее время зеркала Co—Fe обладают в качестве монохроматоров низкой эффек-

тивностью. Более перспективный путь, по-видимому, в том, чтобы генерировать монохроматические псевдослучайные последовательности с различными рабочими циклами на ферритах. Это позволит использовать магнитное отражение от монокристалла для получения импульсных пучков. Спектрометр, основанный на этом методе, сейчас конструируется в Ок-Ридже на реакторе HFIR. Предполагается использовать отражение (111) от кристалла ${}^7\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$.

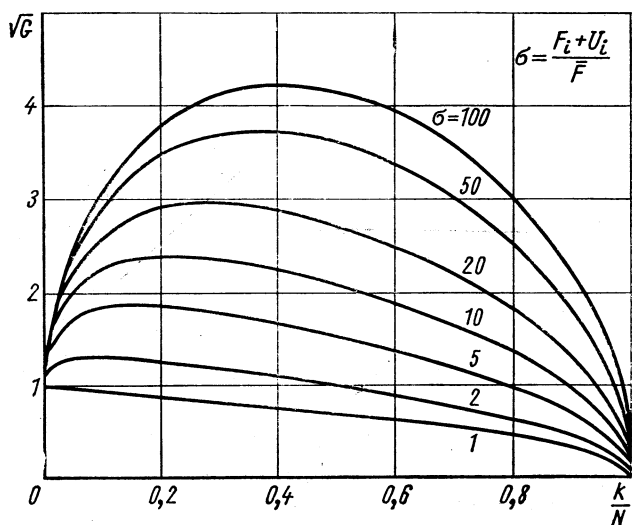


Рис. 19. Зависимость эффективности корреляционного прерывателя от рабочего цикла и от отношения (сигнал + фон) к среднему счету на канал:

F_i —величина сигнала; U_i —величина фона; F —средний сигнал на выходе; \sqrt{G} —коэффициент увеличения относительной точности; k/N —рабочий цикл.

При таком составе ядерная амплитуда и поглощение оказываются очень малыми, а отражательная способность оказывается примерно такой же, как и у горячепрессованного германия, который применялся в трехосном спектрометре. С помощью указанного кристалла можно получить очень короткие импульсы вплоть до 5 мксек.

Можно использовать не один прерыватель, а два. В этом случае эксперименты методом времени пролета позволяли бы сразу измерять спектр как функцию первичной энергии, содержащейся в падающем полихроматическом нейтронном пучке. Очевидно также, что при этом еще больше улучшается отношение сигнала к шуму по сравнению с корреляционной техникой с одним прерывателем. В то время как в последнем случае некоррелированный фон уменьшается в $(N + 1)/2$ раз, теперь он будет дополнительно уменьшен во столько раз, сколько энергетических групп используется одновременно.

Система из двух корреляционных прерывателей показана на рис. 20. Прерыватели должны удовлетворять определенным условиям.

В свое время мы предполагали использовать две одинаковые псевдослучайные последовательности для обоих прерывателей, но

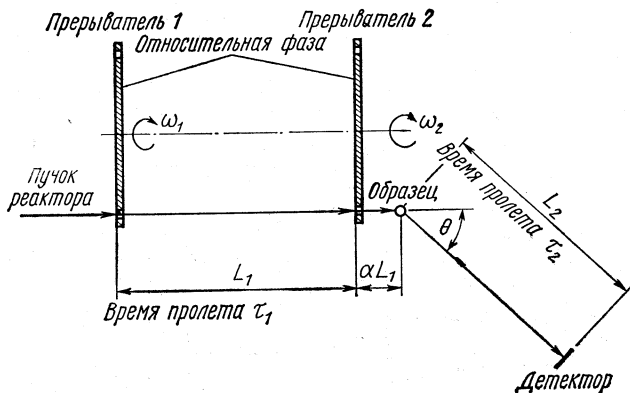


Рис. 20. Схема метода с двумя корреляционными прерывателями.

сместить их по фазе друг относительно друга. Функцию отклика при этом можно получить двойной кросс-корреляцией. Эксперимент этого рода готовится сейчас в Карлсруэ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Я надеюсь, что убедительно показал достоинства корреляционных методов. Они позволяют оптимально использовать непрерывный пучок нейтронов в экспериментах методом времени пролета. Эти методы только еще начинают применяться, и требуется еще много работать, чтобы полностью выявить их возможности.

Опираясь на наш собственный опыт, я думаю, что с помощью этой методики и реакторов с высокой плотностью потока можно будет производить измерения фоновых спектров даже на таких сильно-поглощающих нейтронах материалах, как Cd. Можно будет также с хорошим разрешением производить эксперименты, касающиеся нейтроноводов.

Однако, когда будут созданы импульсные реакторы с интенсивностью в максимуме, превышающей интенсивность современного стационарного реактора на 1—2 порядка, и с разумной скважностью, то с ними корреляционной методике конкурировать будет трудно.