

3134/2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

СЗ44.2

Л-553

13 - 12333

М.Ю.Либург, В.Н.Матафонов, К.Ондрейчка,  
И.Страхота

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ПРОТОННОЙ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНИ  
В РЕЖИМЕ СВЯЗИ С ЭВМ

1979

13 - 12333

М.Ю.Либург, В.Н.Матафонов, К.Ондреичка,  
И.Страхота

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ПРОТОННОЙ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНИ  
В РЕЖИМЕ СВЯЗИ С ЭВМ

Общество с ограниченной ответственностью  
"В.Н.Матафонов и К.Ондреичка"  
ИНН 50-01-0000000

Измерение поляризации протонной поляризованной мишени в режиме связи с ЭВМ

Применение ЭВМ для регистрации и обработки спектров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) от протонов поляризованной мишени позволяет повысить надежность и улучшить точность измерения степени поляризации.

Непрерывный спектр ЯМР, регистрируемый с помощью Q-метра, после аналого-цифрового преобразования передается на ЭВМ в виде числового массива данных. При этом реализуется возможность применения метода накопления для улучшения отношения сигнал/шум при регистрации слабых сигналов равновесной поляризации. Используя информацию о форме спектра ЯМР, в принципе, можно точно вычислить систематические погрешности, связанные с нелинейностью Q-метра.

В протонных поляризованных мишенях, охлаждаемых до температуры ниже 0,1 К/г.н. "замороженных" мишенях/, применение ЭВМ позволит измерять степень поляризации с относительной точностью не хуже 1%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

The Measurement of a Polarized Proton Target Polarization Using an On-Line Computer

The NMR signal obtained by the Q-meter technique is digitized as well as the baseline. The digitization is controlled by an HP 2116c on-line computer which stores the data on a magnetic type. To improve the signal/noise ratio in the measurement of the thermal equilibrium signal, a number of consecutive signals can be used for a detailed analysis eliminating the Q-meter non-linearity effects. The experimental arrangement is described. It is shown that such a use of the computer improves the accuracy of the polarization measurement in comparison with analog methods.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Широкое использование поляризованных мишеней /ПМ/ /1/ в экспериментальной ядерной физике и физике высоких энергий возможно лишь при условии надежных и достаточно точных методов измерений степени их поляризации. Это, в свою очередь, накладывает определенные требования к системам сбора и обработки информации о состоянии мишени.

В эксперименте по измерению параметров Р и D в упругом nP - рассеянии на поляризованной протонной мишени мы осуществили режим связи с ЭВМ HP-2116 для накопления и обработки спектров ядерного магнитного резонанса /ЯМР/.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При измерении поляризации ПМ радиотехническими методами в качестве спин-детектора - датчика сигнала ЯМР - обычно используется Q-метр<sup>2-3/</sup>. Устройство чувствительно к изменению модуля импеданса настроенного колебательного контура, катушка индуктивности которого заполнена ядерным парамагнетиком - веществом мишени, помещенным в постоянное внешнее магнитное поле. Если модуляция частоты ВЧ-генератора, возбуждающего измерительный контур, охватывает весь диапазон частот ларморовой прецессии, то сигнал на выходе Q-метра представляет собой аналоговую форму спектра ЯМР.

Мерой поляризации служит величина, пропорциональная интегральной интенсивности спектра поглощения энергии высокочастотного поля системой ядерных спинов вещества мишени. Форма сигнала, получаемого на выходе Q-метра, лишь в первом приближении пропорциональна форме спектра поглощения, и, следова-

тельно, значение поляризации, полученное в результате интегрирования этого сигнала, содержит, в общем случае, систематические ошибки. Существующие способы <sup>2,4/</sup> уменьшения вклада последних так или иначе связаны с ухудшением добротности измерительного контура. С другой стороны, снижение чувствительности Q-метра приводит к потере точности регистрации сигнала ЯМР, соответствующего тепловому равновесию спиновой системы с термостатом, при котором поляризация рассчитывается по формуле для Больцмановского распределения как функция значения температуры и магнитного поля. Этот, так называемый "неусиленный", сигнал служит для калибровки аппаратуры, и его интегральная интенсивность в триста-четыре раза меньше соответствующей интенсивности "усиленного" сигнала измеряемой ядерной поляризации. Добротность контура обычно выбирается такой, что относительные изменения модуля его импеданса при максимальной поляризации составляют не более 0,3. Для "неусиленного" сигнала эта величина не превышает  $10^{-3}$ . Поскольку амплитуда напряжения генератора, возбуждающего контур, не может быть более  $10 \text{ мВ}$ \*, изменение ВЧ-напряжения, обусловленное ЯМР, для равновесной поляризации составляет  $\sim 10 \text{ мкВ}$ .

Использование ЭВМ для обработки спектров ЯМР помогает решить задачу повышения надежности и точности измерения поляризации мишеней благодаря следующим обстоятельствам:

1. "Неусиленный" сигнал может быть выделен из шумов аппаратуры путем многократного накопления с последующим усреднением, что позволит улучшить отношение уровня полезного сигнала к уровню шумов и помех в  $\sqrt{n-1}$  раз, где  $n$  - число накоплений.

2. Математическая обработка спектров ЯМР обеспечит вычисление величины высокой поляризации с учетом вклада систематических погрешностей, зависящих от формы линии спектра поглощения <sup>5/</sup>.

\* Амплитуду напряжения возбуждающего генератора необходимо по возможности уменьшать, чтобы избежать "насыщения", т.е. разрушения поляризации вследствие резонансного воздействия поля высокой частоты.

## 2. АППАРАТУРА

На рис. 1 представлена функциональная схема системы измерения поляризации в режиме связи с ЭВМ.

Для получения сигналов ЯМР применяется Q-метр, аналогичный описанному в <sup>2/</sup>. Импульсы пилообразной формы /1/, периодически подаваемые на варикап ВЧ-генератора, возбуждающего измерительный контур, обеспечивают девиацию частоты в необходимых пределах. С выхода Q-метра снимается периодическая последовательность сигналов /2/, каждый из которых представляет собой непрерывный спектр ЯМР. Эти сигналы подаются на аналоговый интегратор, осциллограф - для визуального контроля, а также через буферный каскад - на вход блока ДР.

Блок ДР преобразует спектр в серию импульсов переменной амплитуды с огибающей, воспроизводящей форму линии спектра /6/. После преобразования типа "амплитуда-серия" каждого из импульсов в кодировщике БПА-6М в память анализатора АИ-4096, работающего в режиме последовательного заполнения, записывается массив числовых значений функции, описывающей спектр ЯМР. В таком виде информация передается в ЭВМ.

Запись и передача данных осуществляются только по сигналу запроса с машины /4/, который по каналу № 16 подается на один из логических входов ДР. После прихода синхронимпульса /3/, связанного с началом "пилы", на второй логический вход ДР последний вырабатывает сигнал управления кодировщиком /5/, а после записи всего спектра ЯМР - сигнал передачи данных с АИ-4096 в ЭВМ /7/.

Таким образом, хотя сигналы ЯМР поступают из Q-метра с частотой  $50 \text{ Гц}$ , что необходимо для визуального контроля на осциллографе и аналогового интегрирования, моменты приема информации о состоянии мишени определяются программой работы ЭВМ.

Программа приема данных обеспечивает считывание с анализатора заданного числа массивов, проверку правильности считывания, а также суммирование и усреднение содержимого каждой ячейки, если заданное число считываний больше единицы.

Из блока ДР поступает преобразованный спектр на регулируемом "пьедестале". Набор информации производится в два этапа: после приема спектра /сигнал плюс фон/ изменяется внешнее

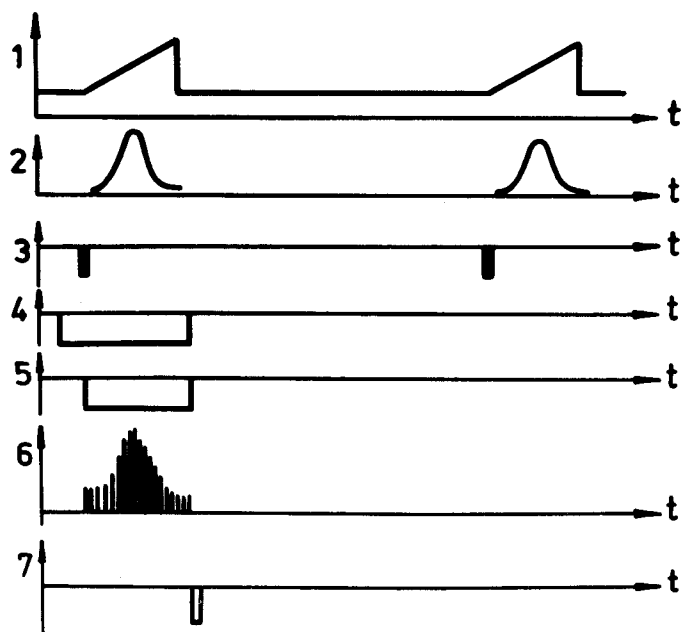
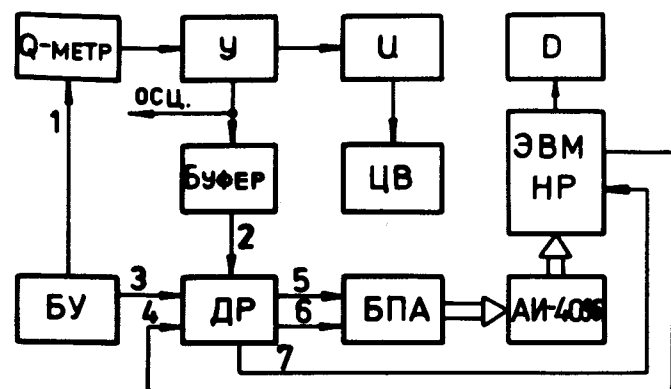


Рис.1. Блок-схема аппаратуры. БУ - блок управления Q-метром, У - усилитель, И - аналоговый интегратор, ЦВ - цифровой вольтметр, БПА - блок амплитудного преобразования, D - дисплей.

магнитное поле в области мишени так, что в диапазоне частотной модуляции сигнал ЯМР не наблюдается, и производится запись "базовой" линии /фон на пьедестале/. После соответствующего вычитания из первого массива данных второго остается "чистый" спектр ЯМР без аппаратурных составляющих. Для сигналов отрицательной поляризации "пьедестал" увеличивается до значения, превосходящего максимальную амплитуду спектра, и, таким образом, после вычитания фона последующие операции производятся с массивом отрицательных чисел. Это избавляет от необходимости введения дополнительного признака: "знак поляризации".

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В качестве вещества мишени использовался кристалл лантан-магниевого нитрата<sup>1/</sup> при температуре  $-1$  К в статическом магнитном поле 20 кГс. Равновесная поляризация в этих условиях составляет около 0,2%. При регистрации неусиленного сигнала с целью привязки отсчета прибора к известному значению поляризации основной задачей является выделение эффекта из шумов и помех. На рис. 2 представлены фотографии одиночного неусиленного сигнала, наблюдаемого на экране осциллографа; длительность развертки - 2 мс. Сравнение приведенных фотографий дает качественное представление о характере шума спин-детекторов: видны сравнительно высокочастотные составляющие, обусловленные собственными шумами электронной аппаратуры, и низкочастотные компоненты, появляющиеся вследствие вибраций установки. Действие низкочастотной компоненты вызывает искажение формы сигнала и базовой линии. Полное представление о соотношении амплитуд полезного сигнала и шумов дает фотография, полученная с экрана осциллографа при времени экспозиции 1 с и частоте запуска развертки 50 Гц /рис. 3/.

При аналоговом интегрировании такого сигнала практически невозможно обеспечить точность регистрации лучше чем 2%.

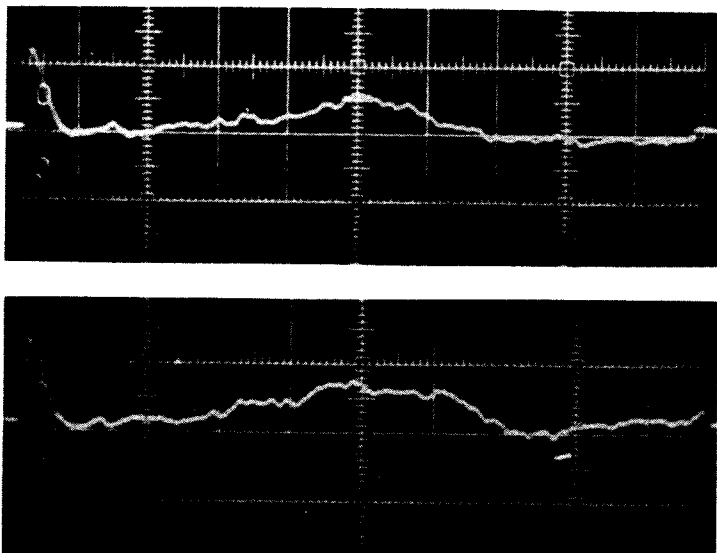


Рис.2. Одиночные сигналы ЯМР равновесной поляризации, наблюдаемые на экране осциллографа в разные моменты времени.

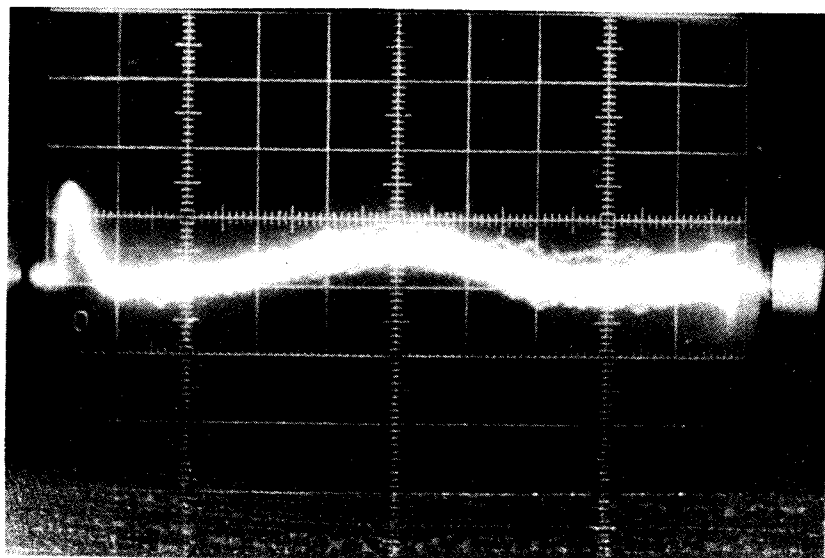


Рис.3. Неусиленный сигнал. Фотография получена при частоте запуска развертки 50 Гц и времени экспозиции 1 секунда.

На рис. 4 представлены фотографии экрана дисплея, на который выведены спектры ЯМР, соответствующие равновесной поляризации и полученные в результате усреднения 200 /рис. 4а/ и 1000 /рис. 4б/ реализаций неусиленного сигнала. Как видно из рис. 4а, в случае 200 накоплений низкочастотная составляющая шума не полностью "усредняется" и вклад ее особенно заметен на краях кривой. В спектре, полученном из 1000 накоплений /рис. 4б/, влияние этой компоненты почти полностью устраняется. Статистический разброс результатов численного интегрирования таких спектров составляет не более 1,4% и 0,5% соответственно для 200 и 1000 накоплений.

На рис. 5 приведены фотографии спектров ЯМР, соответствующих большим значениям положительной +0,52 /рис. 5а/ и отрицательной -0,60 /рис. 5б/ поляризации протонов мишени. В условиях нашего эксперимента время релаксации /распада поляризации/ составляло около 1 часа. Поэтому при длительных экспозициях на пучке частиц необходимо непрерывно осуществлять динамическую накачку. При этом само по себе значение поляризации изменяется во времени. По этой причине мы не имели возможности непосредственно измерять статистический разброс результатов интегрирования спектров ЯМР для одинаковых значений поляризации. Сравнивая результаты численного интегрирования с полученными в те же моменты времени отсчетами аналогового интегратора, мы убедились в полном соответствии обеих групп данных в пределах статистической точности аналогового интегрирования, равной в нашем эксперименте 1,7%. Это значение было принято нами в качестве величины относительной погрешности регистрации сигналов высокой поляризации.

Суммарная среднеквадратичная относительная ошибка измерения поляризации, включающая ошибку измерения температуры /1%/, а также погрешности при регистрации равновесного сигнала и сигнала высокой поляризации, составила при аналоговом методе 2,8%, а при цифровом 2%. Таким образом, аналоговый метод в нашем эксперименте дает для измеренных значений положительной и отрицательной поляризации:

$$-0,668 \pm 0,019 \quad \text{и} \quad +0,528 \pm 0,015.$$

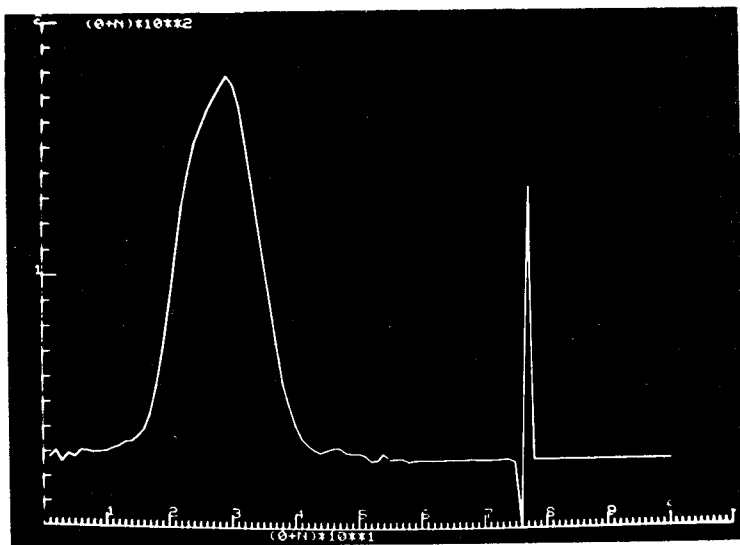
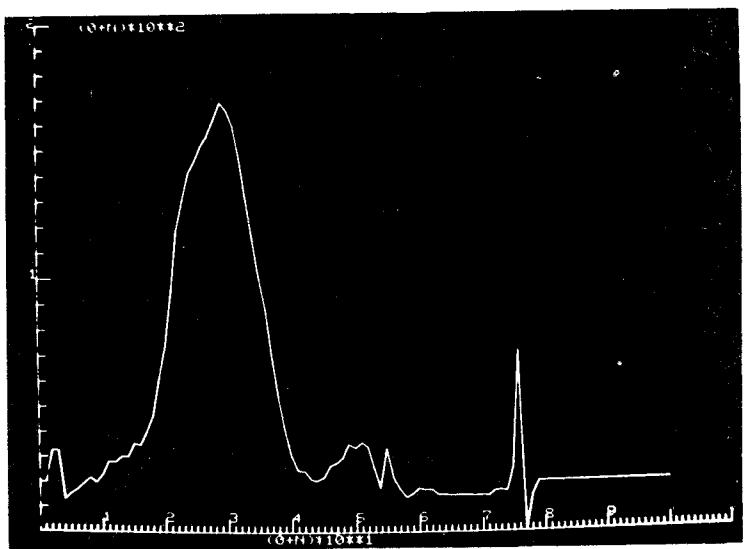


Рис.4. Спектры ЯМР равновесной поляризации, полученные накоплением неусиленного сигнала: а/ 200 накоплений; б/ 1000 накоплений.

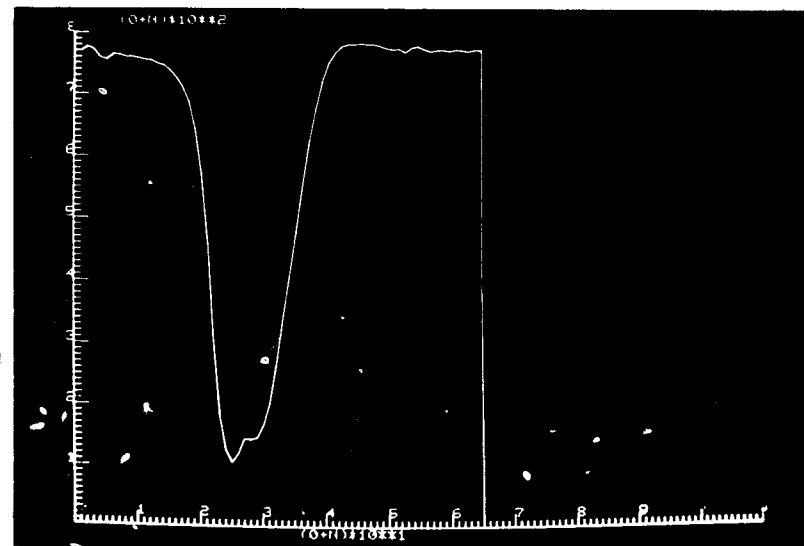
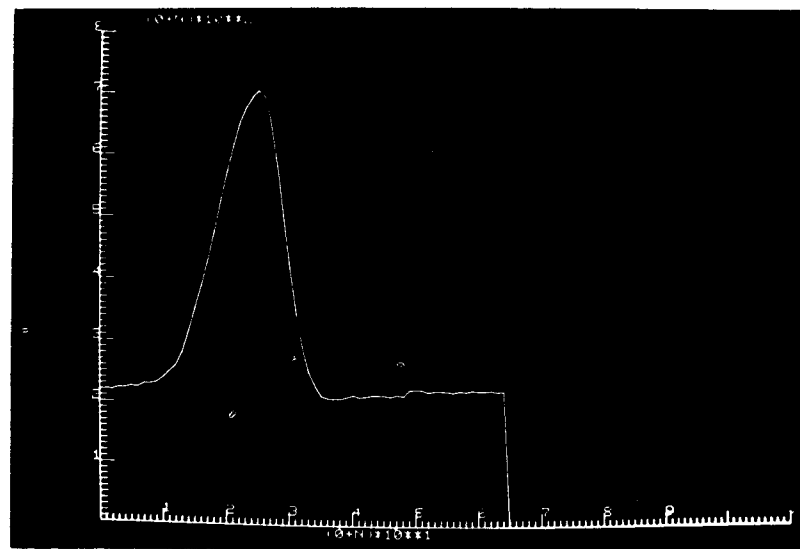


Рис.5. Спектры ЯМР высокой поляризации: а/ положительной, б/ отрицательной.

Результаты измерения поляризации в режиме связи с ЭВМ:

$-0,679 \pm 0,014$  и  $+0,516 \pm 0,010$ .

В заключение необходимо сделать несколько важных, на наш взгляд, замечаний:

1. Улучшение точности измерения поляризации достигнуто пока только за счет уменьшения погрешности при регистрации сигнала теплового равновесия, равной 0,5% при использовании ЭВМ и 2% для аналогового метода. Для погрешности при регистрации сигналов высокой, увеличенной динамическим методом, поляризации мы вынуждены были взять величину, равную точности аналогового интегрирования усиленного сигнала, т.е. 1,7%.

2. Для приведенных значений поляризации и при использовании Q-метра с автоматической подстройкой измерительного контура<sup>2,3</sup> вклад систематических ошибок не превышает 1%. Однако для более высокой поляризации соответствующие поправки должны быть вычислены. При этом численный расчет, производимый на ЭВМ по реальному, полученному в эксперименте спектру ЯМР, может быть выполнен с высокой точностью<sup>4</sup>.

3. В поляризованных мишенях "замороженного" типа<sup>1</sup>, охлаждаемых до температуры ниже 0,1 К, где время релаксации составляет более 100 часов, регистрация спектров ЯМР высокой поляризации может быть произведена с точностью, лучшей чем 0,5%.

Таким образом, мы не видим пока принципиальных ограничений возможностей достижения высокой /не хуже 1%/ точности измерения ядерной поляризации в "замороженных" мишенях.

Авторы выражают благодарность профессору Ю.М.Казаринову за полезные обсуждения, Ю.А.Усову за надежное измерение температуры в области 1 К и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джеффрис К. Динамическая ориентация ядер. "Мир", М., 1965. Борисов Н.С. и др. ОИЯИ, P13-10253, Дубна, 1976.

2. Киселев Ю.Ф., Матафонов В.Н. ОИЯИ, P13-10101, Дубна, 1976.
3. Дражев М.Н., Иваненко А.И. ОИЯИ, P13-7167, Дубна, 1973.
4. Petricek V. Nucl. Instr. and Meth., 1968, 58, p. 111.
5. Hill J.J., Hill D.A. Nucl. Instr. and Meth., 1974, 116, p.269.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 марта 1979 года.