

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13-85-636

В.Н. Дугинов, А.Б. Лазарев

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА
С ПОМОЩЬЮ μ SR-МЕТОДА
В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Направлено на Международную летнюю школу
по сверхтонким взаимодействиям
/ЧССР, Бехине, 1-12 сентября 1985 г./,
на VII Международную школу по физике атомного ядра,
нейтронной физике и атомной энергетике
/НРБ, Варна, 23 сентября - 1 октября 1985 г./

1985

Введение

Исследование свойств вещества с помощью положительных мюонов является интенсивно развивающейся областью применения ядерно-физических методов.

Физическим основанием нового направления исследований стало открытие несохранения пространственной четности в $\pi \rightarrow \mu + \nu$ и $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$ распадах.

Первый из этих распадов позволяет получить пучок продольно поляризованных мюонов, а во втором распаде открывается возможность проследить направление спина мюона, регистрируя излучаемые позитроны. Иллюстрацией может быть рис. I, где P_μ, P_ν, P_{e^+} — импульсы мюона, нейтрино и позитрона, а S_μ, S_ν, S_{e^+} — их спины.

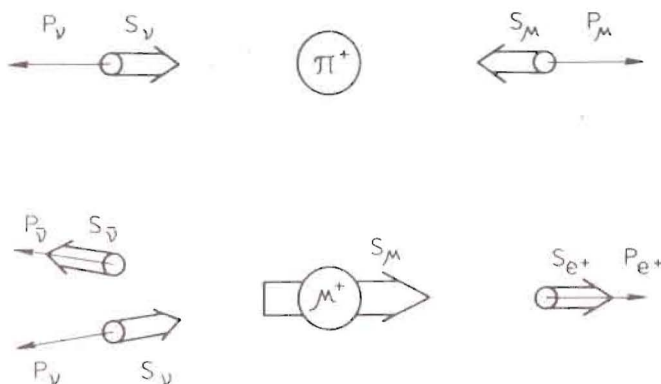


Рис. I. Образование и распад поляризованного мюона.

Угловое распределение позитронов распада описывается формулой

$$W(\theta) \sim 1 + \alpha_0 \cos \theta, \quad (I)$$

где θ — угол между направлением вылета позитрона и спином мюона; α_0 — коэффициент анизотропии, теоретическое значение которого равно $1/3$.

Попадая в мишень, мюоны из-за взаимодействия с веществом изменяют свою первоначальную поляризацию. Позитроны распада позволяют количественно изучать этот процесс. Интенсивность счета позитронов детектором, расположенным под углом θ к пучку, зависит от времени, прошедшего с момента остановки мюона в мишени:

$$dN(\theta, t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau_\mu} [1 + \alpha \cdot P(t) \cdot \cos \theta] dt, \quad (2)$$

здесь коэффициент e^{-t/τ_μ} учитывает поправку на распад мюонов ($\tau_\mu \approx 2,2$ мкс), N_0 и α зависят от интенсивности и характеристик регистрирующей аппаратуры соответственно, а $P(t)$ — поляризация мюонов в момент распада. Таким образом, поляризованные положительные мюоны являются мечеными частицами, поляризация $P(t)$ которых в любой момент времени может быть определена по асимметрии углового распределения позитронов $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}$ распада. Наблюдение за изменением направления спина мюона и составляет сущность μ SR-метода (μ SR — Muon Spin Rotation or Relaxation or Resonance).

Круг задач, решаемых с помощью μ SR-метода, очень широк. Им можно исследовать локальные магнитные поля в веществе /1,16/, относительные объемы сверхпроводящих и нормальных областей в сверхпроводнике /2/, магнитные фазовые переходы /3/, диффузию и локализацию примесной частицы в кристаллической решетке /4,18/, зарядовое состояние водородоподобной примеси в веществе и другие процессы и явления. Более полная информация о применениях μ SR-метода может быть подчерпнута в работах /5-12/.

Постановка эксперимента

Типичная схема μ SR-эксперимента приведена на рис.2. Остановка мюона в мишени, определяемая комбинацией сигналов от сцинтилляционных счетчиков I234, является стартовым сигналом для аналогового преобразователя временных интервалов (АПИ). Сигнал "СТОП" вырабатывается в момент вылета позитрона распада, фиксируемый комбинацией срабатывания счетчиков 3456. Информация об интервалах времени между сигналами "СТАРТ" и "СТОП", преобразованная в код блоком ПК, накапливается в памяти амплитудного анализатора АА и далее обрабатывается на ЭЕМ.

На рис.3 показан сигнал прецессии спина мюона в монокристалле меди /4/, т.е. зависимость скорости счета в позитронном телескопе от времени t , отсчитываемого от момента вхождения мюона в мишень. Такая экспериментальная зависимость характерна для измерений, прово-

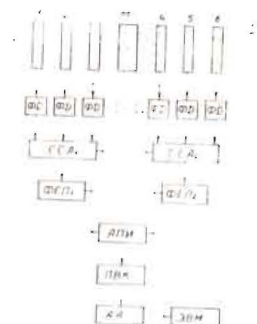


Рис.2. Типичная схема эксперимента.

М — мишень, ФД — формирователи, ССА — схема совпадений-антисовпадений, ПК — преобразователь время-код, АА — многоканальный анализатор, АПИ — аналоговый преобразователь интервалов, ФСП — формирователь со следящим порогом.



Рис.3. Сигнал прецессии спина мюона в меди при $T=30$ К в поперечном магнитном поле.

димых в магнитном поле, перпендикулярном направлению пучка мюонов. При этом формула (2) приобретает вид

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_\mu} [1 + \alpha \cdot P(t) \cdot \cos \omega_\mu t], \quad (3)$$

где ω_μ — частота ларморовской прецессии спина мюона.

Наиболее часто встречающейся задачей при проведении μ SR-экспериментов является изучение изменения свойств вещества или характера диффузии мюона в зависимости от температуры. Это приводит к необходимости создания устройств, обеспечивающих получение требуемых температур, их измерение и стабилизацию. Наиболее сложно это делать в области низких температур.

В таблице приведена информация о минимальных температурах, с которыми работали физики, занимающиеся μ SR-исследованиями. В графе "Организации" в основном указано место проведения экспериментов, так как круг групп, участвующих в этих работах, значительно шире.

Целью нашего сообщения является краткое описание аппаратуры и методических приемов, используемых в низкотемпературных μ SR-экспериментах.

Таблица

Страна	Организация	Температура	Способ получения	Литература
СССР	ОИЯИ	4,2 К	^4He проточный	/13/
	ИАЭ им. И. В. Курчатова ЛИЯФ АН СССР	1,5 К	^4He под откачкой	/14/
	им. Б. П. Константинова			/24/
Канада	TRIUMF	0,5 К	^3He под откачкой	/15, 22/
США	BNL	0,12 К	растворение ^3He в ^4He	/16, 21/
	LAMPF	3 К	^4He под откачкой	/17/
Швейцария	SERV	0,03 К	растворение ^3He в ^4He	/18/
	SIN	2,5 К	^4He под откачкой	/19, 23/
Япония	КЕК	0,09 К	растворение ^3He в ^4He	/20/

Аппаратура для получения низких температур

Мишени из исследуемого вещества обычно представляют собой диски толщиной несколько граммов на квадратный сантиметр. Использование таких массивных образцов является преимуществом μSR -метода при изучении свойств металлов и полупроводников, так как для ЯМР и ЭПР приходится ограничиваться исследованием малых коллоидных частиц. Образцы исследуемого вещества помещаются в криостаты, в которых устанавливается требуемая температура. Конструкция криостатов обусловлена устройством электромагнитов, позволяющим вводить образцы в рабочую область через узкий горизонтальный /13/ или вертикальный /25/ канал между счетчиками 3 и 4 (рис.2) и их световодами. К криостатам для μSR -экспериментов предъявляются следующие основные требования:

1. Для обеспечения большого телесного угла, а следовательно, высокой скорости счета, расстояние между охлаждаемым образцом и счетчиком позитронного телескопа (4 на рис.2) должно быть предельно малым.

2. С целью снижения фона мембраны окон криостата, стоящие на пути пучка, должны содержать минимальное количество вещества.

3. В конструкции деталей, расположенных вблизи рабочей области, необходимо полностью исключать ферромагнитные материалы, искажающие магнитное поле.

4. Криостаты должны обеспечивать быстрое установление температуры образца и стабильное ее поддержание во время эксперимента.

Рассмотрим один из типов криостатов, который использовался сотрудниками Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и ИАЭ им. И. В. Курчатова /13/ для проведения μSR -экспериментов в диапазоне температур 4,2-300 К.

Схематический чертеж металлического вакуумированного криостата для одиночного образца приведен на рис.4.

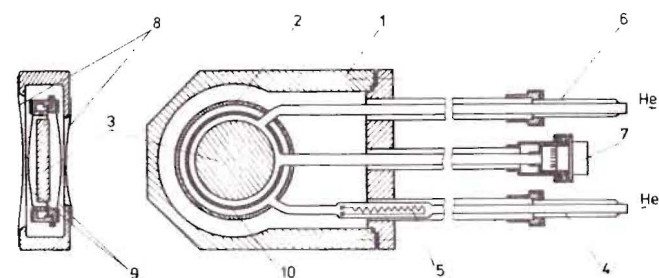


Рис.4. Металлический криостат для работы в диапазоне температур 4,2-300 К. 1 - вакуумный кожух, 2 - корпус контейнера, 3 - образец, 4 - трубка для подачи холодного газа, 5 - нагреватель, 6 - выход газа, 7 - электрический разъем, 8 - окна из майлара, 9 - окна из бериллиевой бронзы, 10 - створка для обдува образца.

Холодный гелий поступает к образцу 3 через трубку 4, на конце которой смонтирован нагреватель 5. Обдув образца осуществляется равномерно с торцевых его сторон через тонкие отверстия 10 в стенке кольцевого канала, окружающего образец. Контейнер для образца 2 представляет собой плоскую цилиндрическую коробку из латуни, имеющую в направлении пучка мюонов окна 9 из бериллиевой бронзы толщиной 100 мкм. Силовое крепление крышки к корпусу контейнера осуществляется с помощью резьбы, а вакуумная герметизация - путем пайки сплавом Вуда. Для уменьшения теплопритока к образцу контейнер с мишенью обернут тонким алюминированным майларом. Вакуумный кожух I криостата сделан из дюралюминия и имеет майларовые окна на пути пучка мюонов. Вакуумный кожух может полностью сниматься, освобождая доступ к контейнеру с мишенью.

Общее количество создающего фон вещества на пути мюонов составляет $0,25 \text{ г/см}^2$. Первый счетчик позитронного телескопа может быть

размещен на расстоянии ~ 35 мм от центра образца. Все это позволяет получить отношение фона к эффекту для такого криостата $10 \pm 1\%$.

Криостат подобного типа с несколько модернизированным контейнером позволяет работать и с веществом, сконденсированным из газовой фазы.

Для получения температур ниже 4,2 К в ряде групп, занимающихся μ SR-исследованиями, используются криостаты с откачкой паров ^4He /14,17,19/ или ^3He /15,22/. Это позволяет охладить изучаемые образцы до 0,5 К.

В настоящее время все больший интерес вызывает проведение μ SR-опытов в миллиградусной области с применением рефрижераторов растворения ^3He в ^4He для охлаждения образцов /16,18,20,21/. Рефрижератор растворения представляет собой более сложное устройство, чем упомянутые ранее криостаты. Принцип действия этих рефрижераторов основан на поглощении тепла при растворении жидкого ^3He в ^4He . На рис.5 показана примерная схема рефрижератора, использовавшегося в LBL (США) группой японских исследователей /16/ для охлаждения исследуемых образцов до 0,12 К.

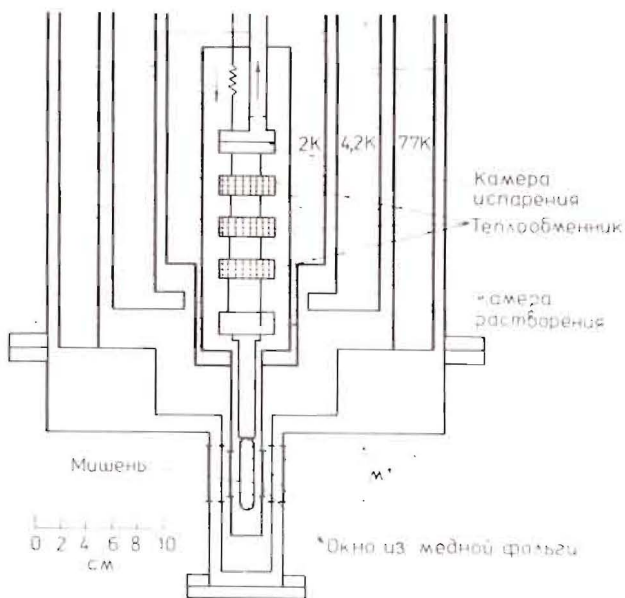


Рис.5. Рефрижератор растворения, применявшийся для μ SR-экспериментов.

Средства измерения и стабилизации температуры

Наибольшее распространение при измерении температуры образцов при изучении свойств вещества с помощью мюонов получили термометры сопротивления: угольные, германиевые, металлические. Они характеризуются хорошей температурной чувствительностью, малой инерционностью, возможностью проведения непрерывных измерений. К термометрам сопротивления близки по своим свойствам диодные датчики температуры. Их действие основано на температурной зависимости падения напряжения на p-n-переходе, через который протекает постоянный ток в прямом направлении /26/.

Фактором, усложняющим проведение точных измерений температур электрическими методами в μ SR-экспериментах, является наличие магнитных полей. На рис.6 показаны границы диапазонов температур и магнитных полей, при которых обычно используют различные типы термометров /11,16,18,27,28/.

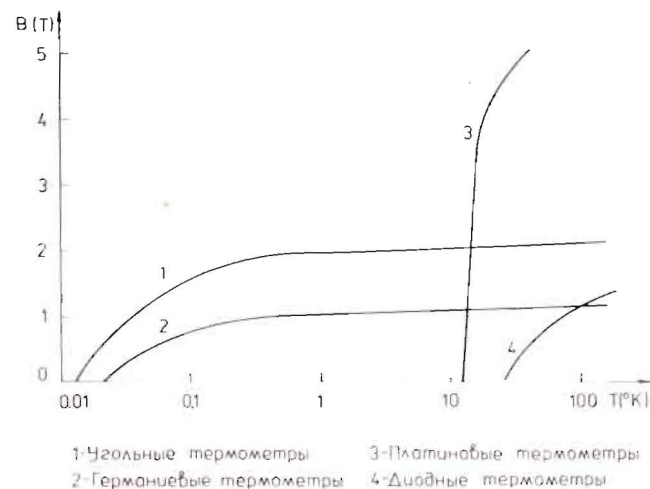


Рис.6. Границы применения различных типов термометров в магнитном поле.

Кривая 1 очерчивает область применения угольных термометров ("Allen-Bradley", "Speer", "Iataushita"). Их достоинством является сравнительно низкая чувствительность к магнитным полям, они малогабаритны и дешевы. Но долговременная стабильность их ниже, чем, например, у германиевых.

Германиевые термометры (кривая 2) позволяют измерять температуру точнее ($\sim 0,001$ K), так как они более стабильны и устойчивы к термоциклированию, дольше сохраняют свою первоначальную калибровку. Однако их показания сильнее зависят от магнитного поля по сравнению с угольными. В сильных магнитных полях эти термометры приходится перекалибровывать /28,29/.

Из металлических термометров лучше других себя зарекомендовали платиновые (линия 3 показывает границу их обычного применения). У этих термометров большой температурный коэффициент сопротивления $\Delta R/\Delta T$, причем он постоянен и очень стабилен при температурах около 30 K и выше. Но при более низких температурах чувствительность платиновых термометров падает, одновременно усиливается зависимость показаний от величины магнитного поля.

Для измерения температур с точностью 0,1 K можно успешно применять серийные кремниевые или германиевые диоды, но из-за долговременной нестабильности характеристик, вызванной деградацией p-n-перехода, они требуют более частой калибровки. Диодные термометры чувствительны к магнитному полю, с понижением температуры эта чувствительность увеличивается.

Наибольшую сложность представляет точное измерение температур ниже 1 K. Теплопроводность большинства материалов при этих температурах сильно падает, и приведение термометра в тепловое равновесие с объектом, температуру которого надо измерить, становится непростой задачей, для решения которой приходится прибегать к различным экспериментальным ухищрениям /30,31/.

На показания термометров начинает влиять и разогрев их мюонами пучка /18/. Поэтому во время эксперимента приходится контролировать температуры ниже 0,5 K датчиками, установленными не на самой мишени, а на холодопроводе, соединяющем ее с камерой растворения.

Малая инерционность и возможность непрерывного измерения температуры, характерные для электрических термометров, позволяют создавать системы автоматического регулирования температуры мишеней. В криостате, описанном выше (см. рис.4), температура образца поддерживается с помощью автоматического устройства, регулирующего как скорость потока холодного гелия, так и его температуру нагревателем 5.

Схема поддержания и контроля температуры образца представлена на рис.7 /13/. Она работает в двух режимах. Для получения низких температур (4,2+20 K) жидкость из гелиевого дьюара 3 через сифон подается непосредственно к образцу. Количество подаваемого жидкого гелия определяется давлением над его поверхностью в дьюаре, которое созда-

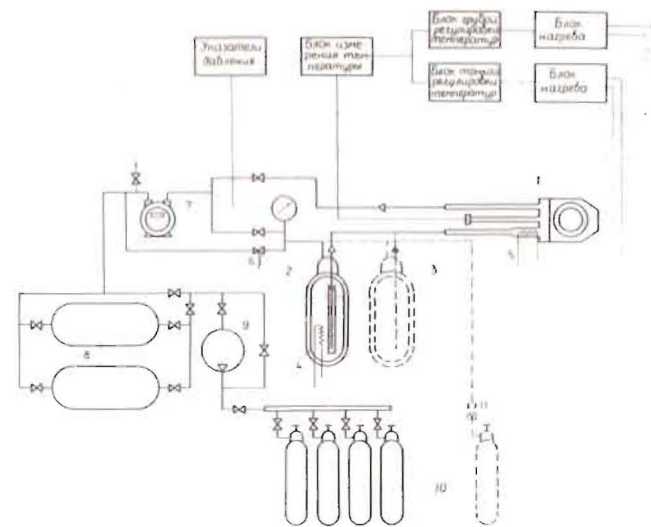


Рис.7. Схема поддержания и контроля температуры образца. I - криостат, 2,3 - дьюары с жидким гелием, 4,5 - нагреватели, 6 - предохранительный клапан, 7 - расходомер, 8 - газгольдеры, 9 - компрессор, 10 - баллоны высокого давления, II - редуктор.

ется газом от баллона 10 (обозначен пунктиром) и регулируется с помощью редуктора. Тонкая регулировка температуры образца производится нагревателем 5. Ток в нагревателе можно устанавливать вручную или автоматически с помощью блока тонкой регулировки, на который поступает сигнал от одного из датчиков температуры.

Для получения температур выше 20 K схема работает в режиме продувки холодного газообразного гелия, образуемого в дьюаре 2 с помощью нагревателя 4. Мощность, вводимая в этот нагреватель, зависит от показаний температурных датчиков и задает скорость потока гелия. Тонкая регулировка температуры, как и в предыдущем случае, осуществляется путем нагрева гелия непосредственно перед образцом нагревателем 5.

Температуру образцов в криостатах, использующих откачку паров гелия, можно регулировать, изменяя скорость откачки и мощность, выделяемую нагревателями. Хорошей стабилизации температуры можно добиться, применяя маностаты, поддерживающие постоянство давления паров над поверхностью жидкого гелия. Удачные устройства этого типа описаны в /32/.

Особенностью применения рефрижераторов растворения в экспериментах по изучению свойств конденсированного состояния вещества является необходимость достижения не только минимальных температур, но и получение и стабилизация любой температуры ниже 4,2 К. Это приводит как к усложнению самих устройств, так и к созданию систем автоматического регулирования с использованием мини-ЭВМ ^{33/}. Температуру ми-гони можно устанавливать нагревателями и подбором скорости циркулиру-щих ³He.

Заключение

Разработка криогенной аппаратуры для проведения μ SR-исследо-ваний является сравнительно новым направлением развития эксперимен-тальной техники. Но опирается оно на значительный опыт, накопленный создателями установок для изучения свойств вещества другими ядерно-физическими методами: дифракция нейтронов ^{35/}, ЯМР и др. Многие кон-структивные и методические решения, такие, как рефрижератор раство-рения с несколькими образцами ^{33/} или продвижение в область еще более низких температур ^{34/}, могут быть сразу взяты для использования.

Вместе с тем установки для проведения μ SR-экспериментов могут совершенствоваться за счет применения специфических конструктивных решений. Представляется возможным, например, размещение образцов в рефрижераторах непосредственно в камере растворения для получения бо-лее однородного охлаждения и повышения надежности термометрии. В экс-периментах с нейтронами это невозможно из-за большого сечения погло-щения нейтронов ядрами ³He.

Для уменьшения фона, связанного с регистрацией остановок мюонов в стенках криостата, желательно поместить счетчики мюонного и позит-ронного телескопов (3 и 4 на рис.2) в холодную зону криостата. Практи-ческая возможность этого доказана ^{36/}.

Авторы считают, что μ SR-метод становится новым и мощным сред-ством изучения вещества при низких температурах, и разработка аппара-туры для этих исследований является интересной задачей.

Мы благодарим В.А.Лукова и В.Г.Ольчевского за обсуждение этой работы и полезные советы, Г.Д.Соболеву - за качественное оформление графического материала.

Литература

1. Гуревич И.И. и др. ЖЭТФ, 1974, 66, с.374.
2. Гребинник В.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, с.82.
3. Гуревич И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, с.16.

4. Гребинник В.Г. и др. ЖЭТФ, 1975, 68, с.1548.
5. Гуревич И.И. и др. ЭЧАЯ, 1977, 8, с.110.
6. Белоусов Ю.М. и др. УФН, 1979, 129, с.3.
7. Пономарев А.Н. Природа, 1980, № 12, с.20.
8. Karlson E. Phys. Reports, 1982, 82, p.271.
9. Celio M., Meier P.F. Phys.Rev., 1983, B27, p.1908.
10. Uemura Y.J. Hyp.Int., 1981, 8, p.739.
11. Borghini M. et al. Physica Scripta, 1979, 20, p.98.
12. Фирсов В.Г. В кн.: Материалы У зимней школы ЛИЯФ по теории ядра и физике высоких энергий. Изд-во ЛИЯФ, Л., 1970, ч.2, с.368.
13. Гребинник В.Г. и др. ПТЭ, 1985, № 5, с.51.
14. Барсов С.Г. и др. Препринт ЛИЯФ, № 1021, Л., 1984.
15. Clawson C.W. Ph.D. thesis, Report LBL-14489, 1982.
16. Nagamine K. et al. Hyp.Int., 1976, 1, p.517.
17. Dodds S.A. et al. Hyp.Int., 1983, 18, p.467.
18. Kehr K.W. et al. Phys.Rev., 1982, B26, p.567.
19. Dorenburg K. et al. Z.Phys.B., 1978, 31, p.165.
20. Kadono R. et al. Hyp.Int., 1983, 17, p.107.
21. Nagamine K. et al. Nucl.Instr.Meth., 1972, 105, p.265.
22. Clawson C.W. et al. Hyp.Int., 1983, 17, p.103.
23. Denison A.B. Helv.Phys.Acta, 1979, 52, p.460.
24. Барсов С.Г. и др. Препринт ЛИЯФ, № 659, Л., 1981.
25. Nishida N. et al. J.Phys.Soc. Japan, 1978, 44, p.1131.
26. Яншак Л. ОИЯИ, 13-80-113, Дубна, 1980.
27. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. "Энергия", М., 1980.
28. Yagi E. et al. Phys.Rev., 1984, B30, p.441.
29. Roy A. et al. Rev.Sci.Instr., 1985, 56, p.483.
30. Anderson A.C. Rev.Sci.Instr., 1980, 51, p.1603.
31. Neumaier K. Rev.Phys.Appl., 1984, 19, p.677.
32. Escorne M., Mauger A. Rev.Sci.Instr., 1983, 54, p.1693.
33. Guckelsberger K. et al. Rev.Phys.Appl., 1984, 19, p.779.
34. Clausen K. et al. Report ТКК-F-A529, Helsinki Univ. of Technology, Otaniemi, 1983.
35. Workshop on Sample environments in neutron and X-ray experiments, Grenoble, 1984 (Rev.Phys.Appl., 1984, 19, No.9).
36. Лазарев А.Б., Огибин А.В. ОИЯИ, 13-83-247, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 августа 1985 года.