

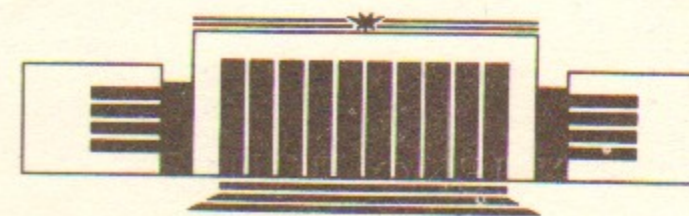


6  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.П. Долбня, В.А. Чернов

**НЕТРАДИЦИОННЫЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ  
ФИЛЬТР-ПОЛЯРИМЕТР  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**ПРЕПРИНТ 91-9**



НОВОСИБИРСК

## Нетрадиционный узкополосный фильтр-поляриметр рентгеновского излучения

*И. П. Долбня., В. А. Чернов*  
Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

### АННОТАЦИЯ

В статье обсуждены и экспериментально проверены узкополосные рентгеновские фильтры-монохроматоры, выделяющие узкую полосу рентгеновского излучения вблизи края поглощения выбранного элемента. Энергетическое положение максимума пропускания фильтра не зависит от условий эксперимента. Ширина пропускания фильтра приблизительно соответствует ширине основного уровня выбранного элемента. Кроме того, обсуждается возможность создания узкополосных фильтров-поляриметров рентгеновского излучения и их применения для изучения процессов неупругого рентгеновского рассеяния, а также использования в методике аномального рассеяния в дифрактометрии.

### Nontraditional X-Ray Narrow Band-Pass Filter-Polarimeter

*I. P. Dolbnya, V. A. Chernov*  
Institute of Nuclear Physics,  
630090 Novosibirsk, USSR

### ABSTRACT

The paper reports the experimentally checked narrow band-pass X-ray filters-monochromators which are able to separate a narrow X-band near the absorption edge of an element required. The experimental conditions have no effect on the energy position of a maximum transmission of the filter. The transmission band of the filter corresponds approximately to the width of the core level of a selected element. In addition, the possibility of creating X-ray narrow band-pass filters-polarimeters is discussed. The range of applicability of these devices, in particular, for research of inelastic X-ray scattering and in the anomalous diffraction scattering technique is under consideration.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно, для монохроматизации и изучения поляризационных свойств рентгеновского излучения используют кристаллы-анализаторы. При работе с рентгеновскими трубками используется их характеристическое излучение. Мощность трубок достаточно мала, чтобы повлиять на параметры кристалл-анализатора. Энергии характеристического излучения дискретно покрывают энергетический диапазон рентгеновского излучения, точно известны и не зависят от условий эксперимента. Одним из достоинств синхротронного излучения (СИ) перед рентгеновскими трубками является возможность плавного и непрерывного изменения энергии рентгеновского излучения. Однако мощность СИ настолько большая, что появляется проблема температурной стабилизации кристаллов-анализаторов и, соответственно, стабилизации энергии используемого излучения. В меньшей степени здесь влияет временной дрейф орбиты электронов в накопителе. В любом случае остается проблема точного определения энергии рентгеновского излучения. В данной работе предлагается новый тип узкополосного фильтра-поляриметра. С некоторой долей риска его можно назвать "химическим". Этот фильтр-поляриметр вырезает энергию чуть ниже края поглощения какого-либо элемента.

## 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРА

В рентгеновской дифрактометрии широко используется дифференциальный (балансный) фильтр—фильтр Росса [1]. Его используют для выделения характеристического излучения рентгеновской трубки. В этом случае для фильтрации излучения используют два последователь-

ных фильтра с краями поглощения с  $E_{k1}$  и  $E_{k2}$ , где  $E_{ki}$  — энергия  $K$ -края поглощения  $i$ -го элемента периодической таблицы. Через фильтр проходит излучение с  $E_{k1} < E < E_{k2}$ . Следует отметить, что полоса пропускания этого фильтра определяется разницей энергетического положения краев поглощения различных элементов периодической таблицы и составляет несколько сотен электронвольт.

Принцип действия описываемого фильтра-поляриметра очень похож. Но он основан на сильном влиянии химического окружения одного и того же элемента на его спектр поглощения. Самым тривиальным следствием этого влияния является энергетический сдвиг спектра поглощения-химический сдвиг.

Другим наиболее интересным для нас эффектом является возникновение узких резонансов поглощения, лежащих по энергии ниже спектра поглощения элемента. В EXAFS-спектроскопии эти резонансы принято называть "white lines". Энергия и форма этого резонанса зависит только от химического соединения элемента. Природа возникновения этих резонансов связана с переходом электрона основного уровня элемента на локализованные вакантные орбитали, образованные взаимодействием атомных орбиталей элемента с атомными орбиталями атомов окружения. Ширина этих резонансов примерно равна ширине основного уровня. Очевидно, что в случае анизотропного окружения атома элемента вероятность перехода и, следовательно, сечение поглощения, в общем случае, должны зависеть от угла между плоскостью поляризации налетающего фотона и выделенным направлением анизотропного окружения.

Перейдем к описанию фильтра. На рис. 1 схематически изображен его принцип действия. Падающее рентгеновское излучение, изображенное

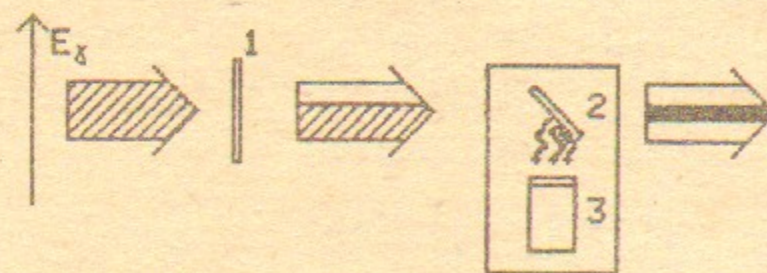


Рис. 1. Фильтр-поляриметр: 1 - фильтр 1; 2 - мишень 2; 3 - рентгеновский сцинтилляционный детектор.

на рисунке широкой, полностью заштрихованной, стрелкой проходит через предварительный фильтр 1. В качестве предварительного фильтра выбирается химическое соединение, край поглощения континуума которого лежит по энергии  $E_1$  выше энергии резонанса  $E_R$  мишени 2, но ниже энергии края поглощения континуума  $E_2$  мишени 2 —  $E_R < E_1 < E_2$ . Прошедшее через фильтр 1 излучение с энергией ниже края поглощения  $E_1$  попадает на мишень 2. В свою очередь, это излучение поглощается только резонансом поглощения мишени 2 на

энергии  $E_R$ . Детектор 3 регистрирует флюоресценцию элемента в мишени, возникающую при заполнении основной дырки. Таким образом функцию отклика такой системы в приближении тонкой мишени 2 можно записать как:

$$T(E) \approx N_0 \omega_k c^z e^{-\mu_1(E) \rho_1 t_1} (1 - e^{-\mu_2(E) \rho_2 t_2}), \quad (1)$$

где  $N_0$  — падающий поток,  $\omega_k$  — относительный выход флюоресценции,  $c^z$  — средняя концентрация элемента в образце-мишени,  $\mu_1, \rho_1, t_1, \mu_2, \rho_2, t_2$  — массовые коэффициенты ослабления, плотности и толщины, соответственно, фильтра 1 и мишени 2.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились на канале СИ из вигтлер-магнита, установленного на накопителе ВЭПП-3 (2 ГэВ, 20 кГс, 100—150 мА). Схема эксперимента показана на рис. 2. Для монохроматизации излучения использовался монохроматор типа "бабочка" (Si(220)) (4). Для того, чтобы подавить отражения высших порядков, после монохроматора

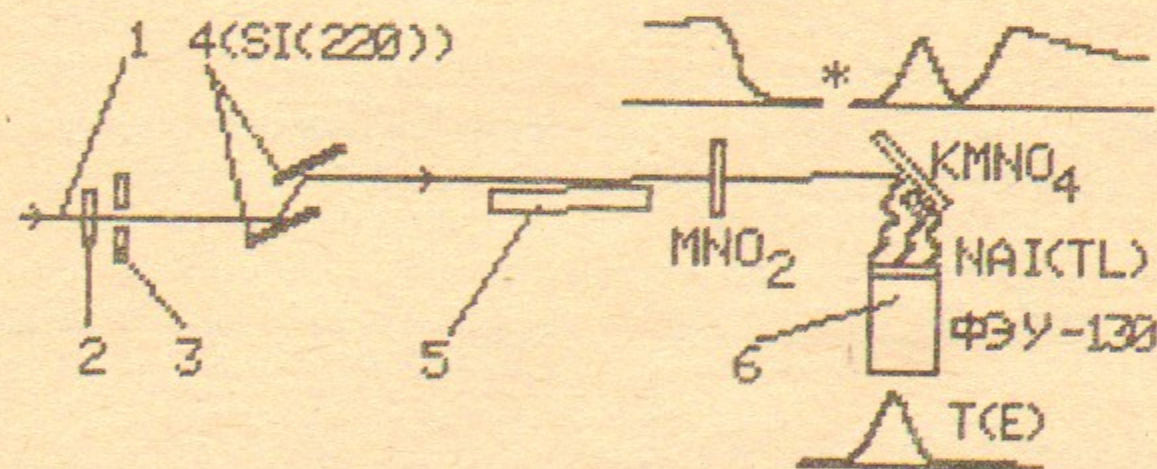


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — "белый" пучок СИ; 2 — горизонтальный коллиматор; 3 — вертикальный коллиматор; 4 — кристалл-монохроматор; 5 — зеркало; 6 — рентгеновский сцинтилляционный детектор.

ставилось кварцевое зеркало скользящего падения (5). После отражения от зеркала монохроматизированное излучение попадало на фильтр. Флюоресцентное излучение мишени-фильтра регистрировалось сцинтилляционным детектором на ФЭУ-130 с сцинтиллятором NaI(Tl) (6). Для уменьшения вклада рассеянного излучения ось мишень-детектор была параллельна вектору поляризации первичного пучка. Функция отклика фильтра  $T(E)$  снималась путем сканирования монохроматора (4) по энергии.

В качестве мишени было выбрано соединение  $\text{KMnO}_4$ . Спектр поглощения  $K$ -края  $\text{Mn}$  в  $\text{KMnO}_4$  был снят по флюоресцентной методике (был убран первичный фильтр) без изменения схемы эксперимента. Спектр приведен на рис. 3, *a*. Как видно из спектра  $K$ -край поглощения  $\text{Mn}$  в этом соединении имеет интенсивный резонанс поглощения, находящийся по энергии ниже порога континуума примерно на 20 эВ. Интенсивность резонанса сравнима с максимумом спектра поглощения континуума.

Такого вида спектр характерен для оксианионов  $3d$  металлов, где центральный атом находится в тетраэдрическом окружении атомов кислорода [2]. Сечение поглощения резонанса в данном случае не зависит от угла вследствие отсутствия выделенного направления в тетраэдрическом окружении. В качестве предварительного фильтра были исследованы различные соединения марганца  $\text{MnO}$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MnF}_2$ , не имеющие предкраевых особенностей. Энергия края континуума этих соединений лежала между энергией резонанса и энергией континуума  $\text{KMnO}_4$ . Как и следовало ожидать, функция отклика  $T(E)$  практически не зависела от замены этих соединений в предварительном фильтре.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3, *b* приведен типичный экспериментальный спектр, представляющий собой функцию отклика  $T(E)$ . На спектре выделяется резонанс

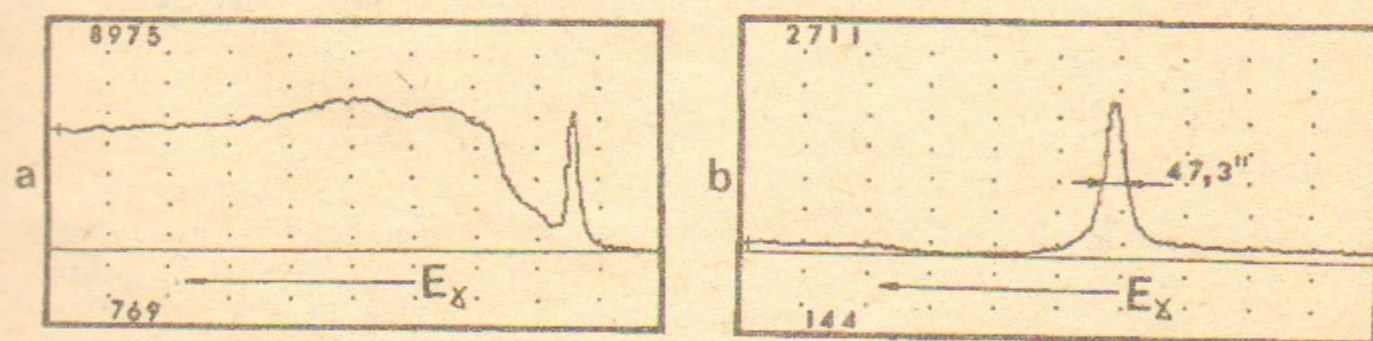


Рис. 3. Энергетический спектр: шаг сканирования монохроматора  $4.3''$ . Ширина резонансного пика  $\sim 47.3''$  ( $\approx 0.85$  эВ).

Лорентцевского типа, совпадающий по форме и энергетическому положению с резонансом поглощения в спектре  $\text{KMnO}_4$ . При этом полуширина на полувывсоте этого пика составляла  $\sim 47.3''$  ( $\approx 0.85$  эВ), при отношении максимум пика  $R_{\text{max}}$  к оставшемуся после фильтра фону  $R_{\text{фон}}$  равном  $R_{\text{max}}/R_{\text{фон}} = 10-11$ . Необходимо отметить, что при почти полном

подавлении фильтром с высокоэнергетической стороны резонанса, с его низкоэнергетической стороны наблюдается медленно спадающий хвост. Этот хвост объясняется механизмом резонансного комбинационного рассеяния [3]. Присутствие на спектрах низкоэнергетического хвоста накладывает ограничение на общую ширину по энергии падающего на "химический" фильтр излучения с энергией ниже энергии края поглощения предварительного фильтра. С другой стороны, по-видимому, вклад этого хвоста в интегральный отклик  $T(E)$  можно вычитать, если использовать модуляционную методику, периодически заменяя в мишени  $\text{KMnO}_4$  на  $\text{MnO}_2$  и беря разность получаемых загрузок детектора.

В случае использования фильтра для изучения процессов неупругого рассеяния, при изменении по энергии фотонов накачки, падающих на исследуемый образец, регистрируется интенсивность неупруго рассеянных фотонов на одной энергии. При этом основная часть фотонов, упруго и неупруго рассеянных образцом, будет лежать выше по энергии резонанса фильтра, там где функция отклика фильтра практически равна нулю, что дает повышение чувствительности эксперимента.

Другой интересной областью применения "химических" фильтров является методика аномального рассеяния в дифрактометрии. Как известно, действительная часть  $f'(E)$  атомной функции рассеяния сильно уменьшается вблизи края поглощения атома. Однако при этом резко увеличивается и  $df'(E)/dE$  — крутизна изменения  $f'(E)$ . Следовательно, при использовании этой методики необходимо точно знать энергию дифрагированного излучения, не допускать дрейфа этой энергии, и, кроме того, энергетическое распределение дифрагированного излучения не должно превышать ширины края поглощения элемента. Всем этим требованиям удовлетворяют "химические" фильтры.

#### 5. ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРА-ПОЛЯРИМЕТРА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В случае использования химических соединений с низкой степенью симметрии ближайшего окружения атома элемента (появление выделенного направления) в виде монокристаллов некубической сингонии или текстурированных поликристаллов появляется возможность измерения поляризации падающего излучения. Возможность такого типа измерений связана с появлением угловой зависимости сечения поглощения  $\sigma_R(E, \theta)$  резонанса от угла  $\theta$  между вектором поляризации падающего на фильтр излучения и направлением локализованных вакантных орбиталей атомов в кристалле.

Возможны два варианта реализации поляриметра такого типа. В одном случае схема эксперимента такая же как и для фильтра-монокроматора, но мишень анизотропна. Во втором варианте для предварительного фильтра и мишени используется одно и то же "анизотропное" вещество, но направления анизотропии фильтра и мишени взаимно перпендикулярны. Численным моделированием на компьютере были построены функции отклика фильтра-поляриметра в зависимости от ширины энергетического распределения падающего рентгеновского пучка и в зависимости от угла вращения поляриметра вокруг оси,  $\theta$ . Использовались следующие приближенные формулы:

$$\mu_1(E, \theta) = \frac{B\delta E^2 \pi \cos^2 \theta}{(E-E_R)^2 + (\delta E)^2} + \text{arctg} \left( \frac{E-E_0}{\Delta E} \right)$$

для фильтра 1 и, соответственно,

$$\mu_2(E, \theta) = \frac{B\delta E^2 \pi \sin^2 \theta}{(E-E_R)^2 + (\delta E)^2} + \text{arctg} \left( \frac{E-E_0}{\Delta E} \right)$$

для мишени 2. Здесь  $B$ —варьируемая константа,  $E_R$ ,  $\delta E$ —энергия и ширина резонанса поглощения,  $E_0$ —энергия края поглощения,  $\Delta E$ —ширина энергетического распределения. Формула (1) была также использована. На рис. 4 показан результат моделирования для функции

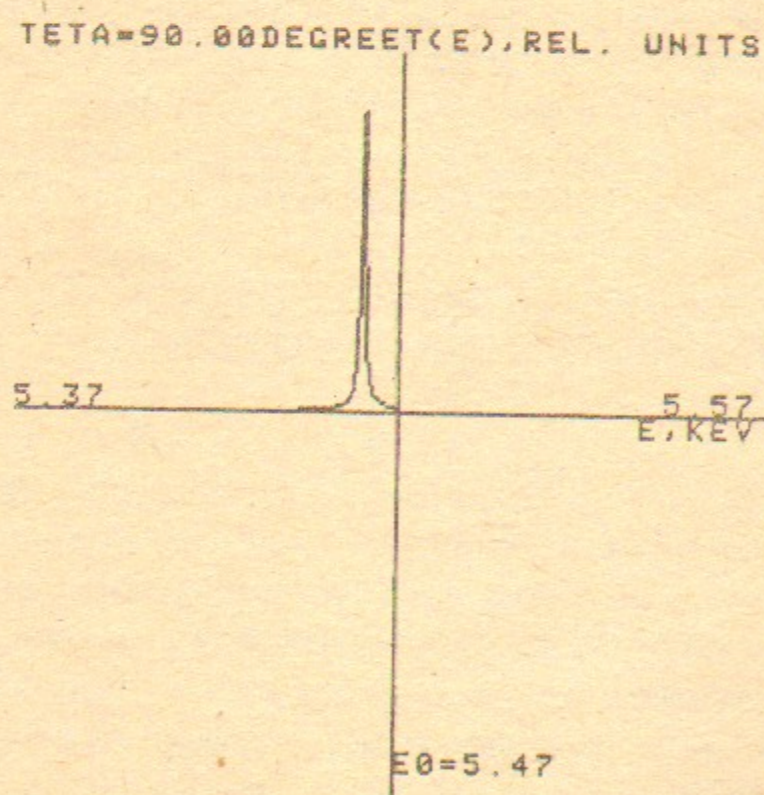


Рис. 4. Вычисленная функция  $T(E)$  для системы на основе  $V_2O_5$ , угол  $\theta = 90^\circ$ .

отклика  $T(E)$  фильтра-поляриметра на основе соединения  $V_2O_5$  вблизи его  $K$ -края поглощения ( $E_0 = 5460$  эВ) при ширине энергетического распределения  $\Delta E = 200$  эВ, ширине резонанса поглощения  $\delta E = 1$  эВ и угле  $\theta = 90^\circ$ . Из рисунка видно, что для подобных систем можно ожидать хорошее выделение резонансного пика и относительно малый вклад в функцию  $T(E)$  как высокоэнергетического, так и низкоэнергетического

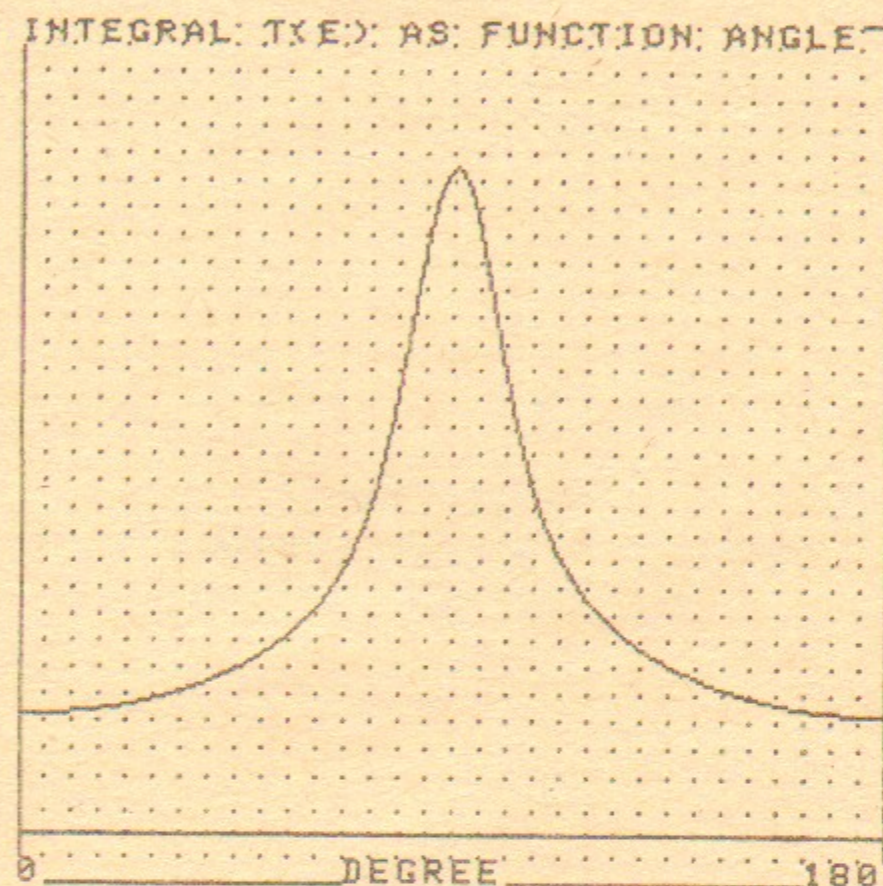


Рис. 5. Проинтегрированная на интервале энергий  $\Delta E = 200$  эВ функция отклика в зависимости от угла  $\theta$  для системы на основе  $V_2O_5$ .

по отношению к резонансу хвостов распределения. На рис. 5 для той же системы на основе  $V_2O_5$  представлена зависимость интеграла функции  $T(E)$  по ширине энергетического распределения от угла  $\theta$ . Рисунок демонстрирует очевидную возможность измерения поляризации налетающего излучения с помощью описанного фильтра-поляриметра.

К сожалению, из-за отсутствия монокристаллов мы не смогли экспериментально проверить свойства "химических" фильтров по измерению поляризации. В дальнейшем планируются эксперименты на монокристалле либо текстурированном поликристалле  $V_2O_5$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. P.A. Ross. Phys. Rev., 28 (1962) 245.
2. F.W. Kutzler, C.R. Natoli, D.K. Misemer, S. Doniach and K.O. Hodgson. J. Chem. Phys., v. 73,3274(1980).
3. P. Eisenberger, P.M. Platzman and H. Winick. Phys. Rev., v.B13 (1976) 2377.

*И.П. Долбня, В.А.Чернов*

Нетрадиционный  
узкополосный фильтр-поляриметр  
рентгеновского излучения

---

Ответственный за выпуск: С.Г. Попов

Работа поступила 17 января 1991 г.

Подписано в печать 17.01 1991 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16. Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.д.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 9.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.