

Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка

к 40-летию ИБР-2

В.Л.Аксенов

Рефлектометрия поляризованных нейтронов

Три этапа пути. Итоги. Направления развития.

Семинар ЛНФ 29 февраля 2024 г.

ИБР-2: 1966, 1969, 1977, 1980, 1982, 1984

**1970 – начало организации инфраструктуры ФКС
рук. Ю.М.Останевич**

Новые направления (относительно ИБР-30):

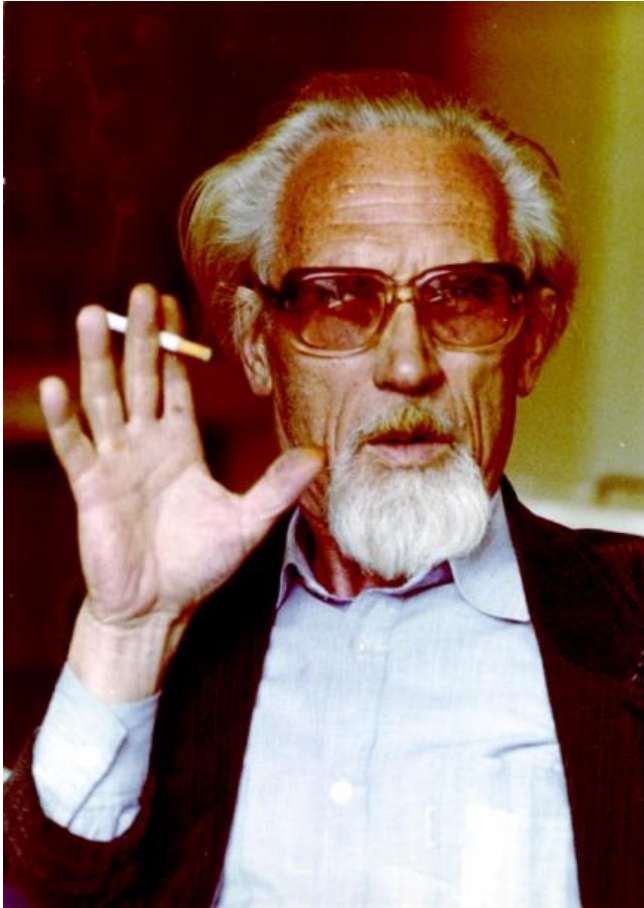
- * Корреляционный анализ квазиупругого рассеяния –
Н.Кроо
- * Динамическая дифракция – Р.Михалец
- * Нейтронная радиография – В.М.Назаров
- * УХН – Ю.В.Таран
- * **Оптика поляризованных нейтронов – А.Байорек**

1. Д.А. Корнеев - основатель РТН в ЛНФ

Из дневника Д.А.Корнеева (1974 г.)

«Мы не хотим получать ерундовые задачи ... Мы мечтаем о сверхзадачах и чтобы, если справимся, – гордиться этим всю жизнь».

Зеркальные нейтроноводы



Владимир Максимович Назаров
(10.12.1931 – 30.12.1994)

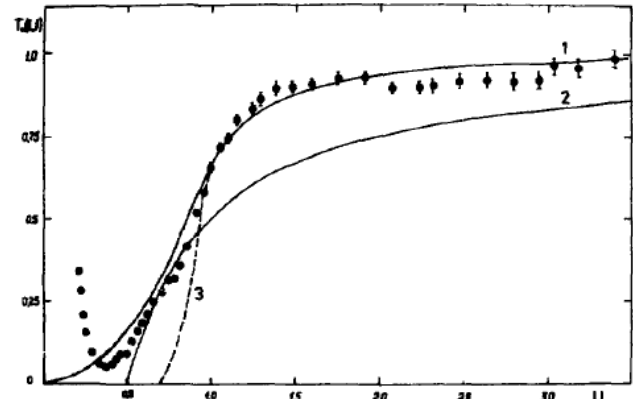


Рис.4.1 - коэффициент пропускания $T_0(U)$ для изогнутого ЗН по формуле /3/, закрытые точки - экспериментальные данные; 2 - ЗН установлен под углом θ^* относительно оси пучка; 3 - дважды изогнутый нейтроновод /8/.

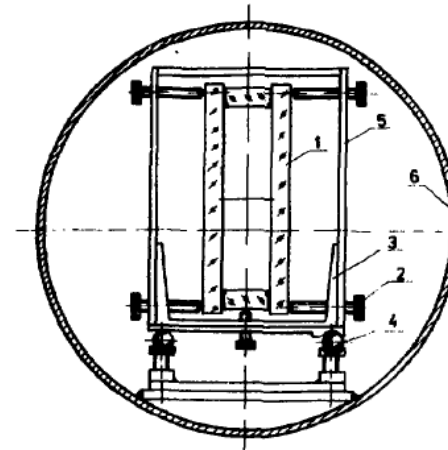


Рис.5. Сечения ЗН ИБР-2. 1 - 12 мм стекла FLOAT с напыленной пленкой Ni, толщиной 2000 Å; 2 - востриговочные винты; 3 - опора из швеллеров; 4 - шариковые направляющие; 5 - винтовые планки; 6 - труба для создания вакуума.

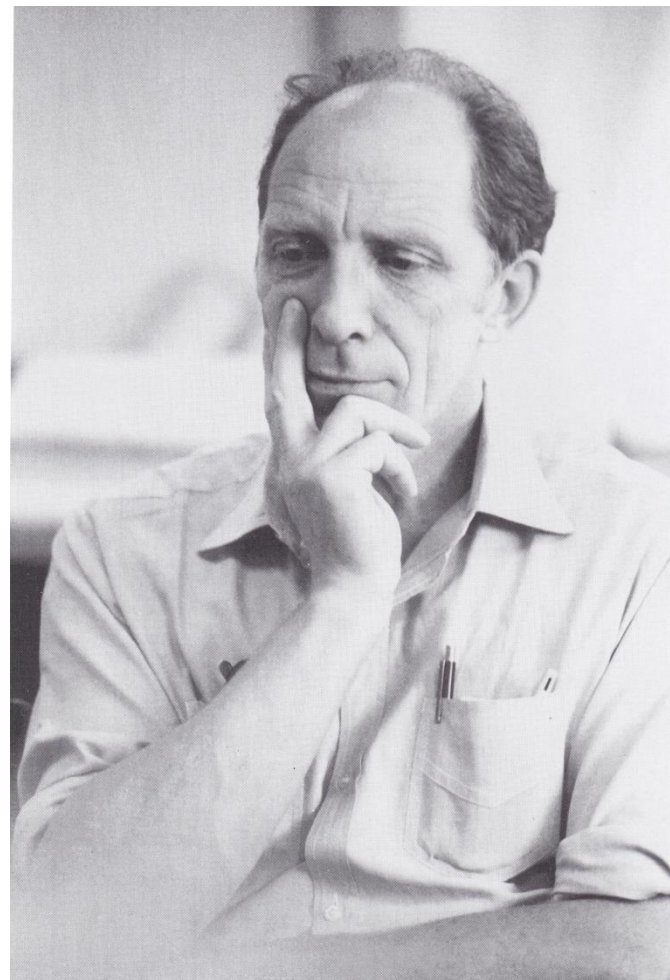
ция которого схематически представлена на рис.5. Коэффициент пропускания тоже имел минимальное значение /0,6/ в районе 4-5А, но, как и ожидалось, был выше, чем у 35-метровой модели /0,4/.

ЛИЯФ РАН (Гатчина) - ЛНФ ОИЯИ



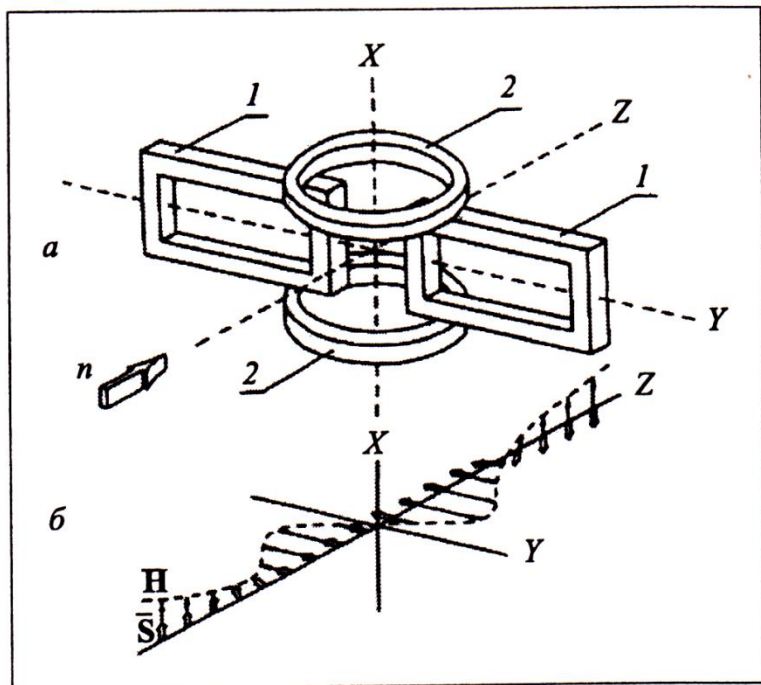
С коллегами из ЛИЯФ, 1973

Drabkin G.M., Okorokov A.I., Schebetov F.A.,
Borovikova N.V., Gukasov A.G., **Korneev D.A.**,
Kudrjashov V.A., Runov V.V. *Multilayer Fe-Co mirror
polarizing neutron guide* // Nucl. Instr. Meth. 1976.
V. 133. P. 453.



Юрий Мечиславович Останевич
(25.07.1936 - 1.08.1992)

Спин-флиппер Корнеева



Спин-флиппер с протяженной рабочей областью: 1 – основные прямоугольные катушки; 2 – компенсационные круглые катушки. Стрелка n показывает направление нейтронного пучка.

Корнеев Д.А. Спин-флиппер с протяженной рабочей областью для немонахроматических пучков нейтронов. Препринт ОИЯИ Р13-12362. Дубна, 1979; Korneev D.A. // NIM. 1980. V. 169. P. 65–69.

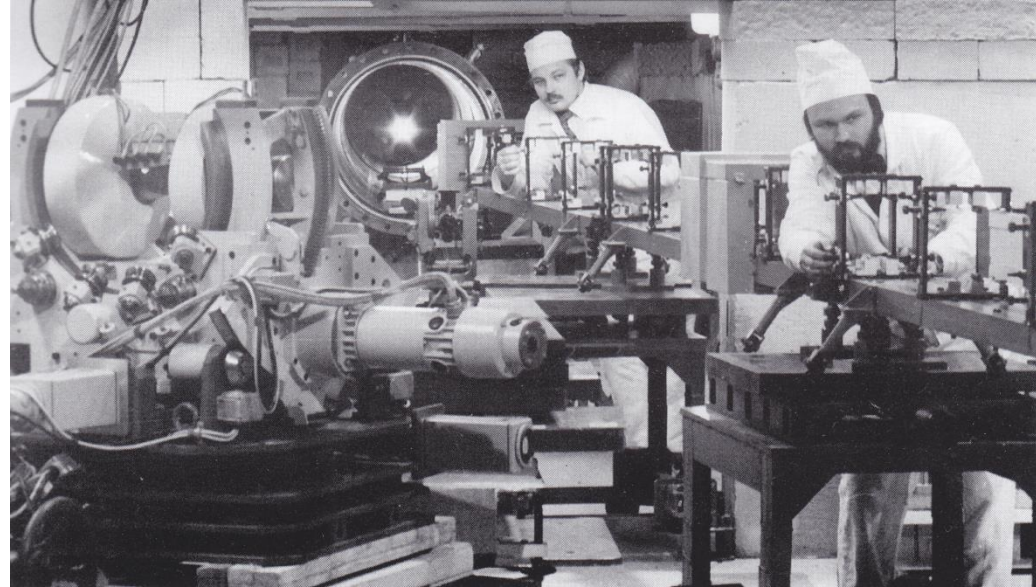
Корнеев Д.А. Способ определения вероятности реверса спина при прохождении нейтрона через спин-флиппер. Препринт ОИЯИ 33-80-65. Дубна, 1980.

Корнеев Д.А., Кудряшов В.А. Экспериментальное определение физических характеристик спин-флиппера с протяженной рабочей областью. Препринт ОИЯИ Р3-80-350. Дубна, 1980; Korneev D.A., Kudriashov V.A. // NIM. 1981. V. 179. P. 509–513.

Спектрометр поляризованных нейтронов (СТН, 1984, 1988)



**Д.А.Корнеев (в центре) с коллегами из
Магдебурга (ГДР).**



А.В.Петренко и Е.Б.Докукин на СТН (1988)

Dokukin E.B., Korneev D.A., Loebner W., Pasjuk V.V., Petrenko A.V., Rzany H. Neutron depolarization study of static magnetization fluctuations in ferromagnets. JINR, E-88-459. Dubna, 1988.

Korneev D.A., Pasyuk V.V., Petrenko A.V., Dokukin E.B. Neutron reflectivity studies on superconducting, magnetic and absorbing thin films at the pulsed reactor IBR-2 // Surface X-Ray and Neutron Scattering / Eds. H.Zabel and I.K.Robinson. Springer-Verlag, 1992. P. 213–217.

Спектрометр СПН-2 (1997)

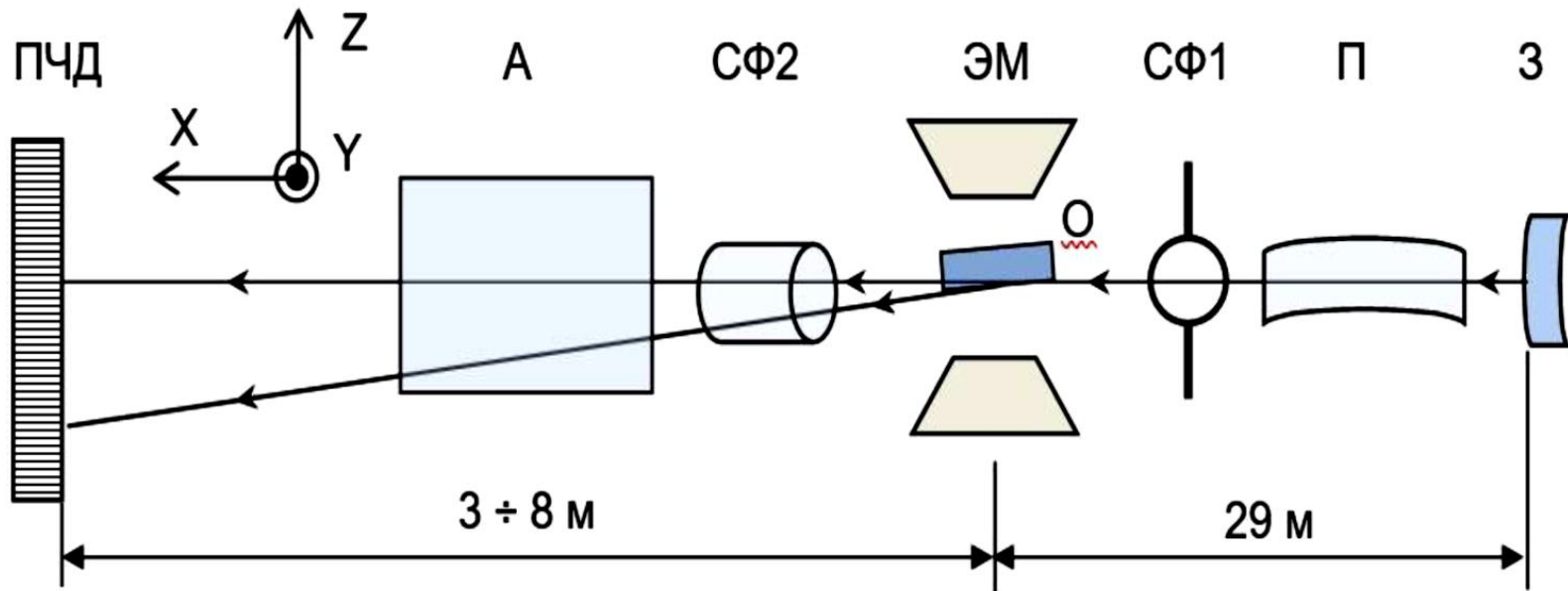
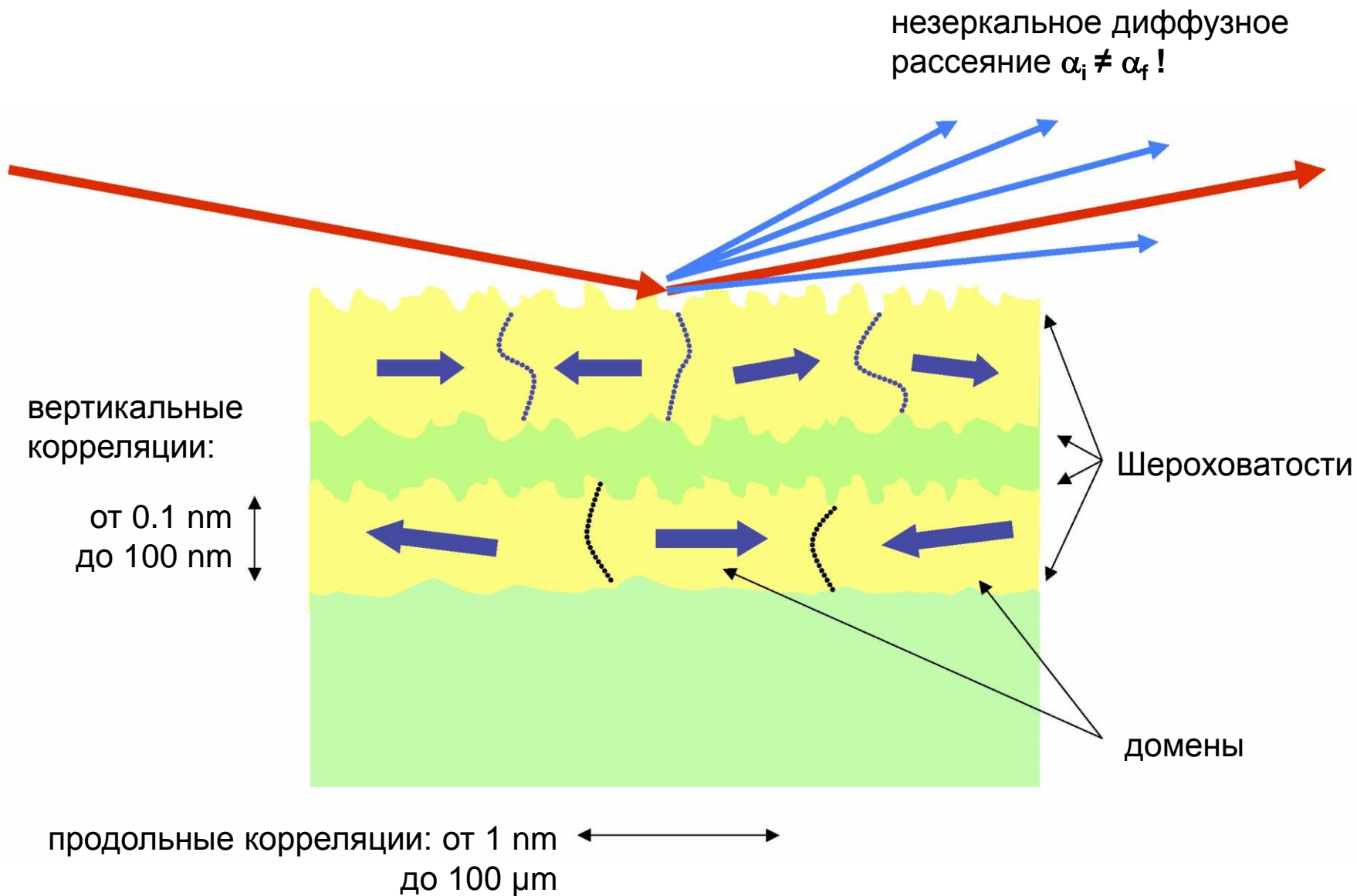
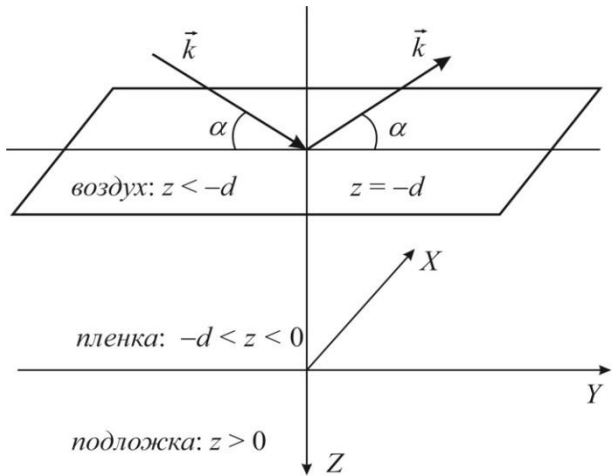


Схема рефлектометра поляризованных нейтронов СПН-2 (вид сверху): 3 – замедлитель реактора; П – поляризатор; СФ1 – первый спин-флиппер; ЭМ – электромагнит; О – образец; СФ2 – второй спин-флиппер; А – многощелевой анализатор на суперзеркалах; ПЧД – позиционно-чувствительный детектор. Плоскость образца расположена вертикально, рассеяние происходит в горизонтальной плоскости.

Оптика нейтронов вблизи угла скольжения



Стандартная рефлектометрия на СПН-2



Схематическое изображение зеркального отражения.

Зеркальное отражение:

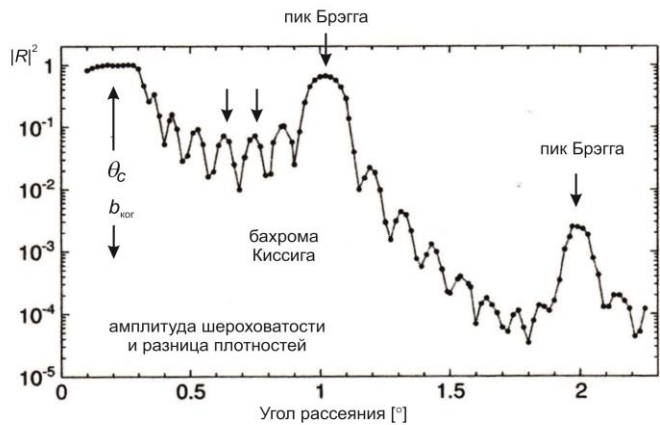
$$\alpha_i = \alpha_f = \alpha, \quad \theta - 2\alpha \ll 1$$

Приближение бесконечных идеальных поверхностей: $k_f'' = k_i''$ $q_{||} = k_f'' - k_i'' = 0$

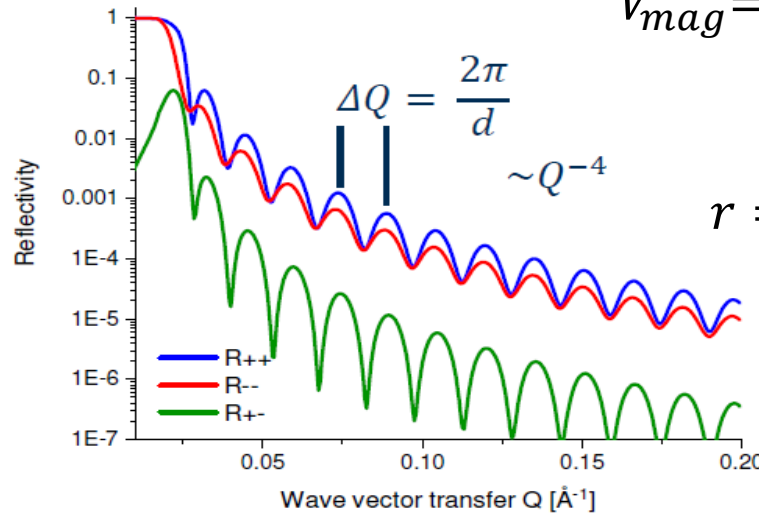
$$V(z) = \langle V(x, y, z) \rangle_{xy} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \rho(z)$$

$$V = V_{nuc} + V_{mag}$$

$$V_{mag} = -\mu B = |\mu_n| \sigma B$$



Отражение от многослойной структуры $8 \times [\text{Ni}(7\text{nm})/\text{Ti}(7\text{nm})]$ на стекле. $\lambda = 4.7 \text{ \AA}$. Видны пики Брэгга и бахрома Киссига.



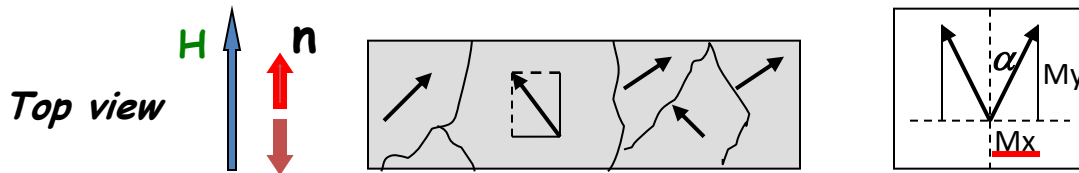
$$r = \begin{pmatrix} r_{++} & r_{+-} \\ r_{-+} & r_{--} \end{pmatrix}$$

Magnetic off-specular scattering from magnetic domains

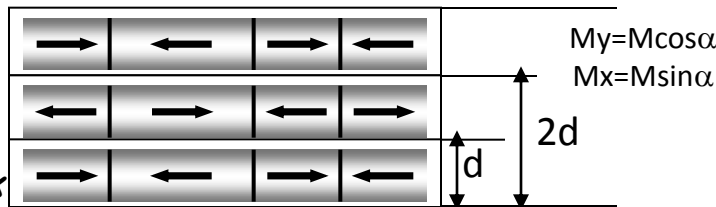
Scattering from a magnetic multilayer: $[\text{Fe}(70\text{\AA})\text{Cr}(10\text{\AA})]_{\times 12}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Polarised neutrons

Smooth interfaces,
in-plane domains $\xi_2 = 2800 \text{\AA}$



Side view:
magnetic domains
are conformal
across the ML stack



Spin-flip magnetic off-specular scattering

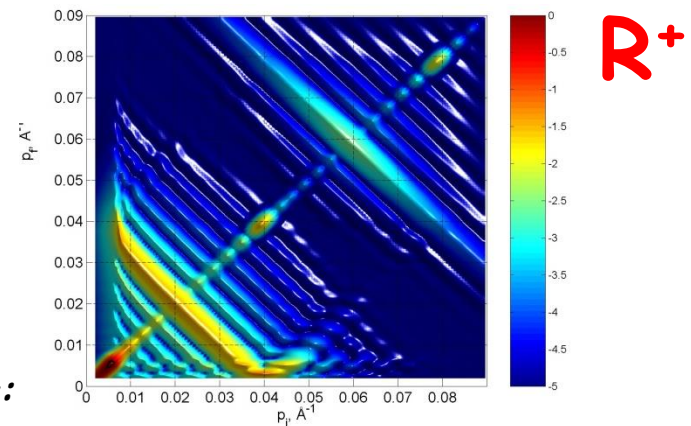
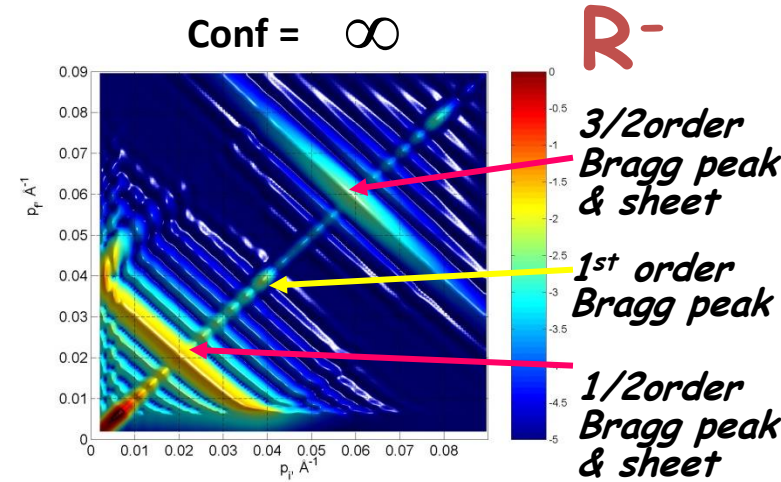
$$d\sigma/d\Omega \sim M_x$$

Non-spin-flip magnetic off-specular scattering

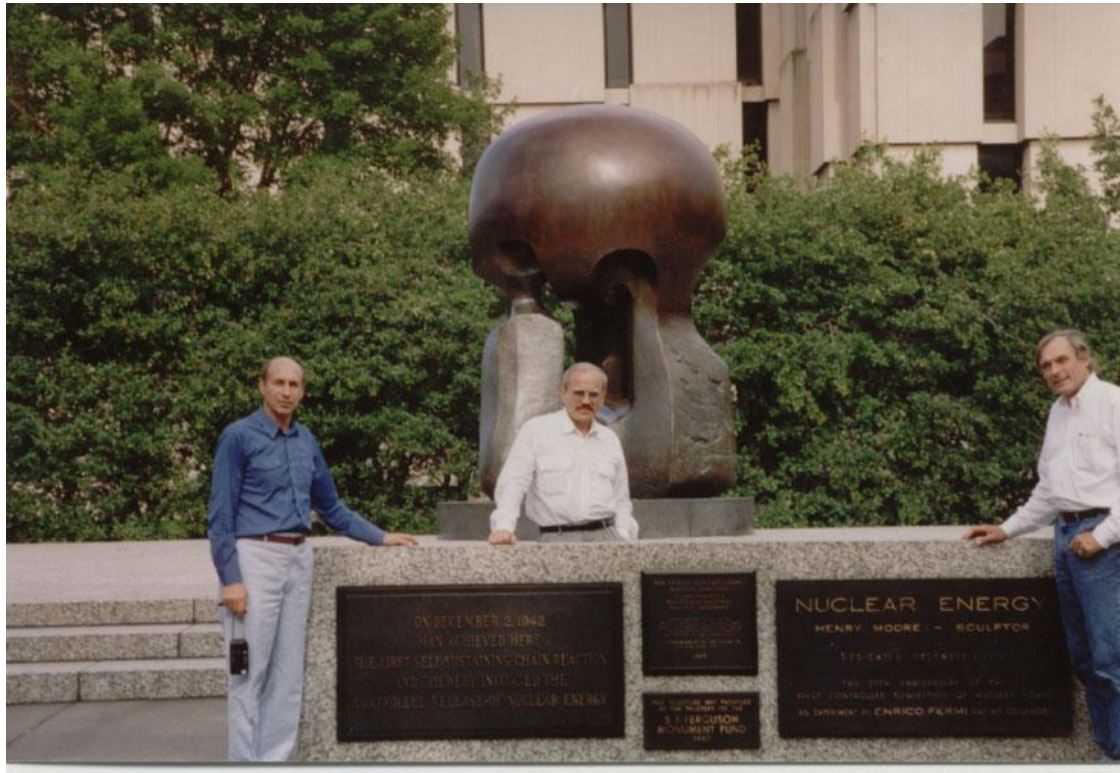
$$d\sigma/d\Omega \sim \Delta M_y$$

Spin-flip Magnetic off-specular scattering is asymmetric:

$$V^\pm = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \rho b \mp g_n \mu_n \mu_0 \sigma M_y$$



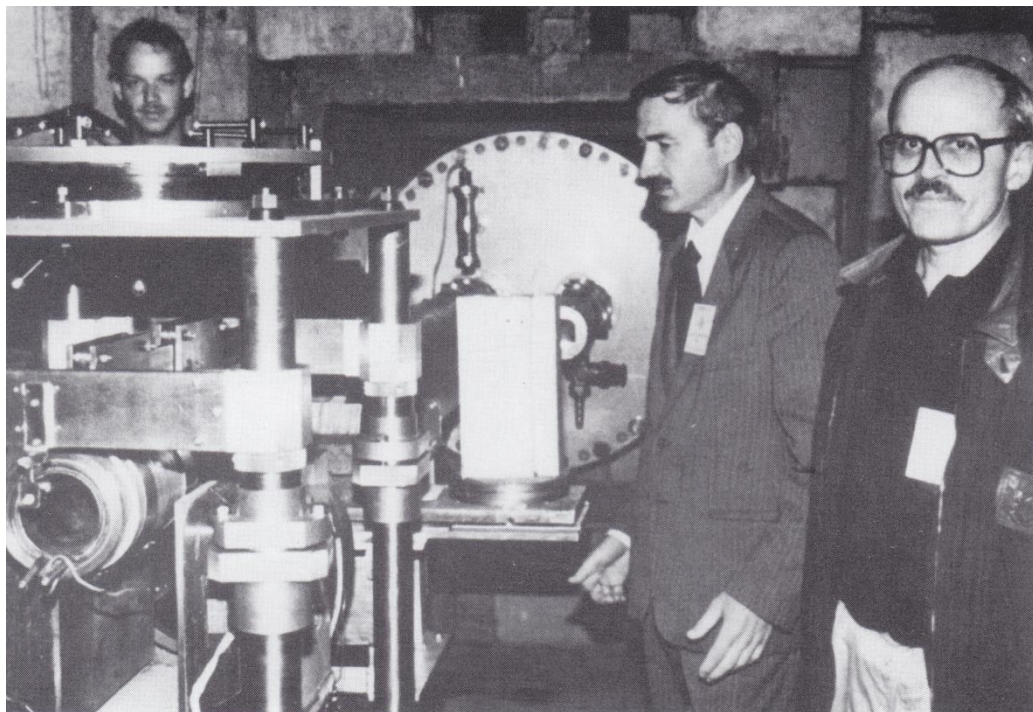
Рефлектометр РЕФЛЕКС (1996)



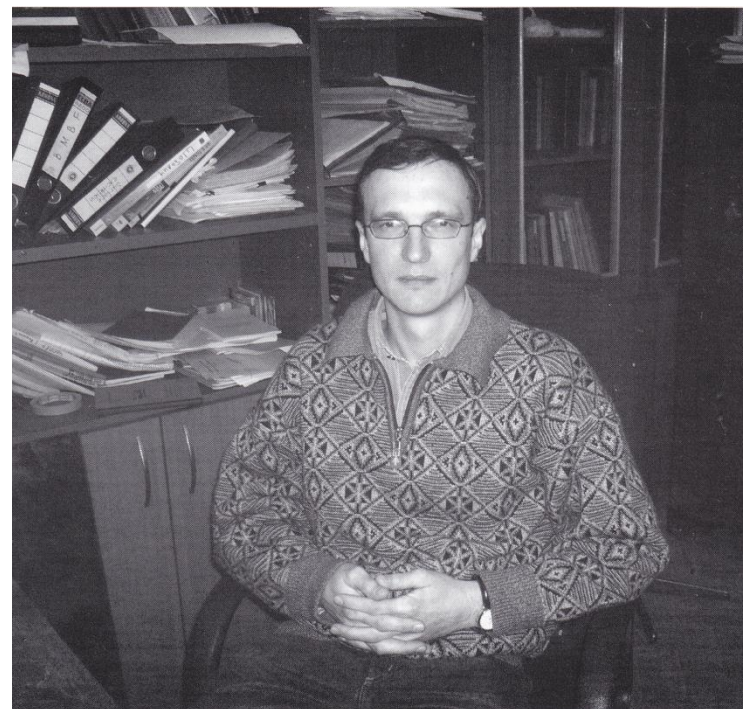
С Дж.Карпентером у памятника реактору Ферми в Чикаго, 1992

Korneev D.A., Aksenov V.L., Chernenko L.P. *The TOF four-beam neutron reflectometer REFLEX at the high flux pulsed reactor IBR-2 and some possible applications // SPIE Proc. Ser. 1992. V. 1738. P. 335–345.*

Рефлектометр РЕФЛЕКС-П (2001)



На установке РЕФЛЕКС



Ученик и коллега В.И.Боднарчук

Корнеев Д.А., Боднарчук В.И., Ярадайкин С.П. *Рефлектометр поляризованных нейтронов РЕФЛЕКС-П. ОИЯИ РЗ-2002-189 (2002).*

Неупругое рассеяние в рефлектометрии

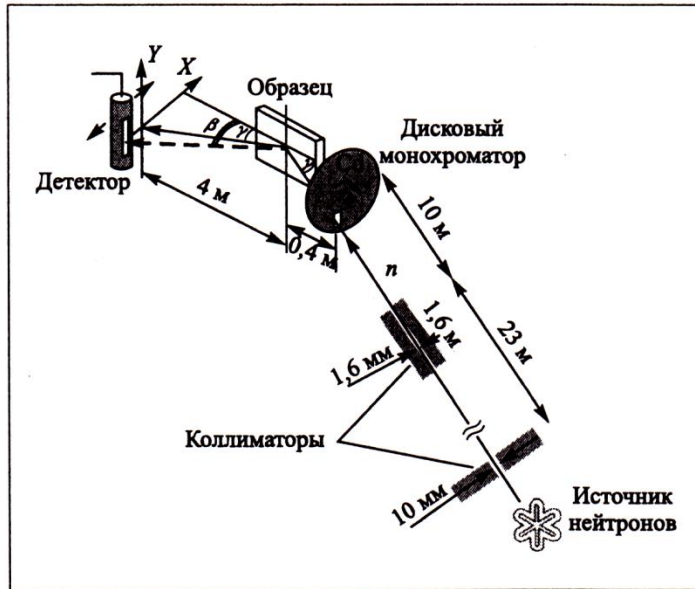


Схема эксперимента по поиску неупругого рассеяния нейтронов на немагнитных возбуждениях поверхности.

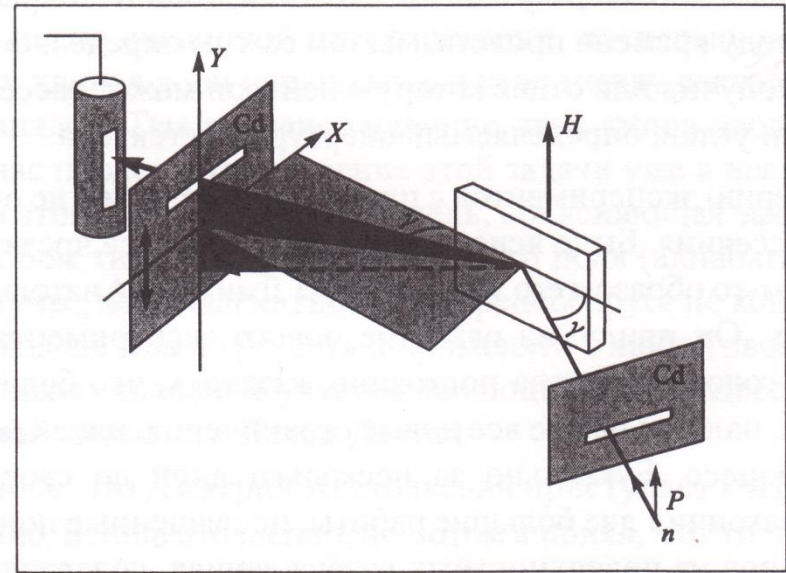
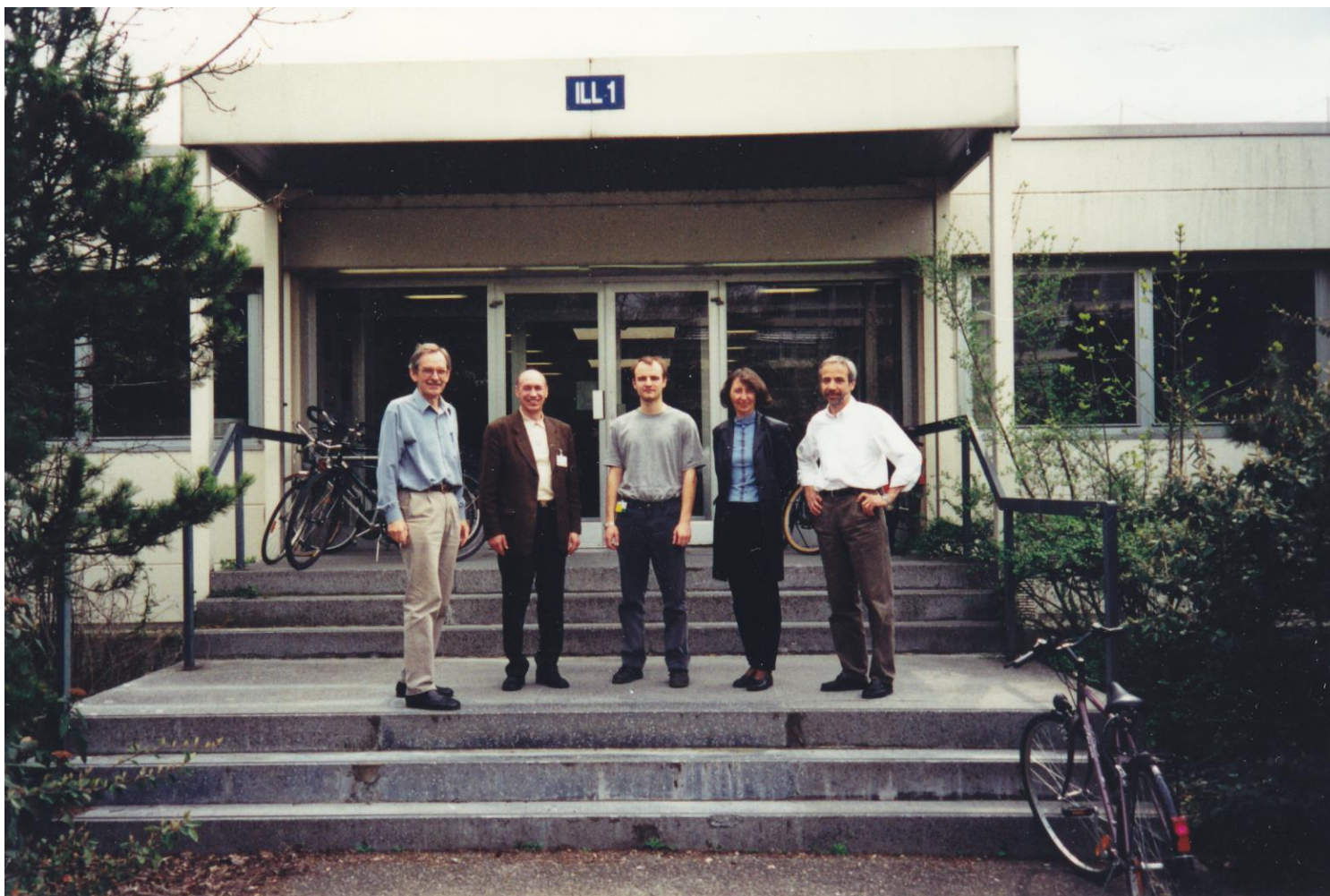


Схема эксперимента по поиску неупругого рассеяния нейтронов на планарных магнитных возбуждениях в тонких пленках по методу времени пролета.

В.И. Боднарчук

2. Трехмерная рефлектометрия



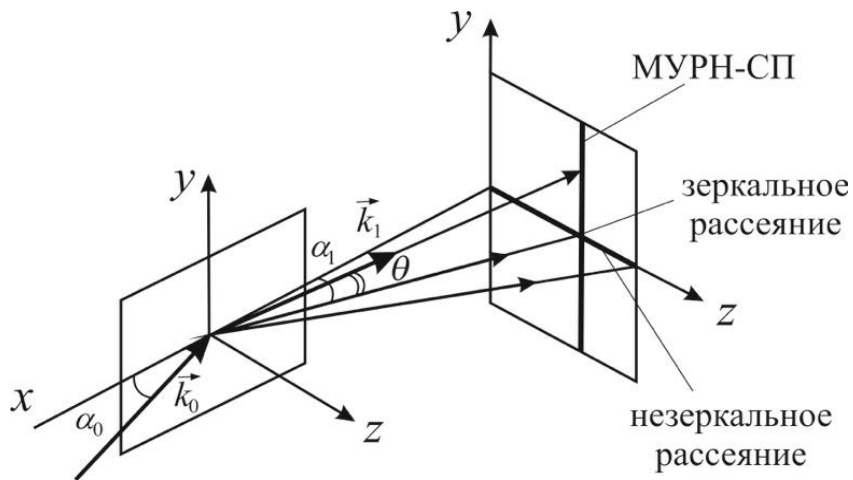
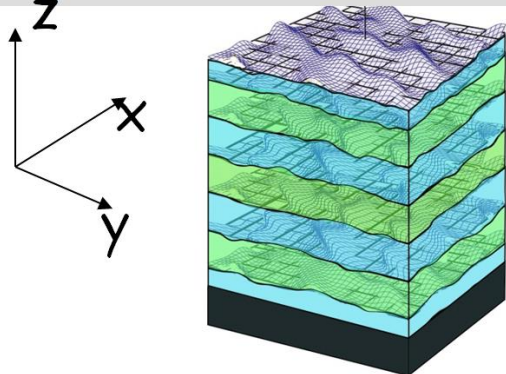
Рефлектометр РЕМУР (2003)



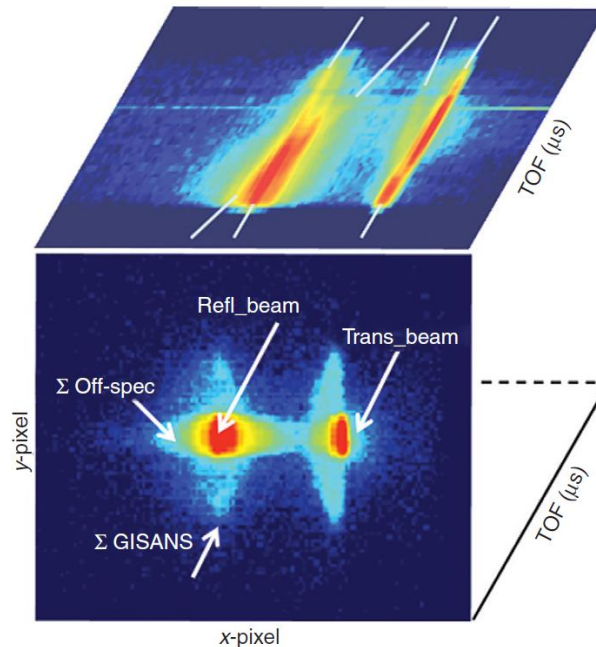
Ю.В.Никитенко, А.В.Петренко, Х.Лаутер, В.Л.Аксенов,
С.В.Кожевников, В.А.Ульянов (2003)

3D - рефлектометрия на РЕМУР

$u_z(x, y)$ - смещение поверхности в вертикальной плоскости
 ξ_x, ξ_y - корреляционные длины



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{зерк.}} + \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{незерк.}} + \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{МУРН-СП}}$$



PS-b-PBMA
 x-y-pixel
 плоскость – это плоскость 2D детектора.
 Верхняя поверхность проекции Refl. и Trans beam

TOF зеркальное, незеркальное и GISANS от полимерного нанокомпозита $\theta = \text{const}$,
 $\lambda = 2 \div 4.7 \text{ \AA}^{-1}$

Усреднение и когерентность

Амплитуда незеркального рассеяния усредняется по всем объемам когерентности, ограничивающим в обратном пространстве все возможные значения волновых векторов падающих нейтронов и покрывающих весь образец.

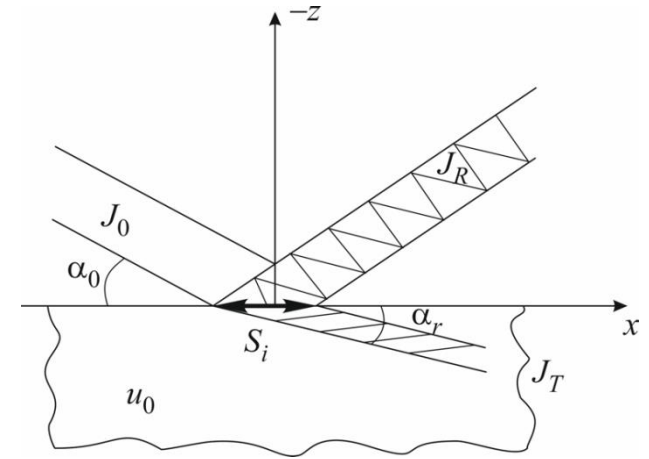
Эллипсоид когерентности : $l_y \ll l_z \ll l_x$

Типичные параметры : $\alpha_i \approx 1$ мрад, $\Delta\alpha_i \approx 0.2$ мрад,

$\Delta\phi \approx 10$ мрад (азимутальный угол) $\lambda = 0,6$ нм

$$l_z \approx \frac{\lambda}{2\pi \Delta\alpha_i} \approx 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^2 \text{ нм}$$

$$l_x \approx \frac{\lambda}{\pi \Delta\alpha_i \alpha_i} \approx 10^6 \text{ нм} \quad l_y \approx \frac{\lambda}{2\pi \Delta\phi} \approx 10 \text{ нм}$$



Распространение падающего J_0 , отраженного J_R и преломленного полных потоков в плоскости (z, x) .

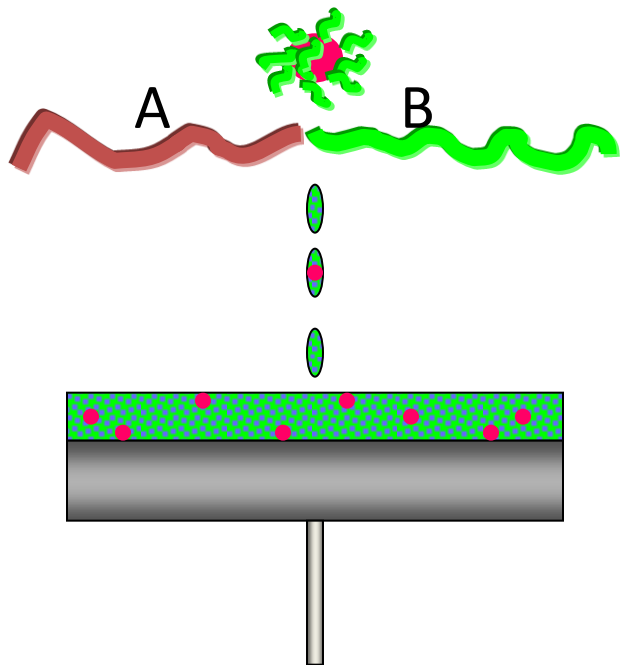
Зеркальное отражение – некогерентная сумма интенсивностей от отдельных пятен когерентности $S_{\text{coh}} = l_x l_y \approx 10^{-7} \text{ см}^2 \ll 1 \text{ см}^2$ (см. детали В.К. Игнатович «Нейтронная оптика» 2006)

Неоднородности размером больше длины когерентности приводят к искажению отраженного пучка: угловому уширению или изменению формы спектра отраженного пучка.

Неоднородности в плоскости образца меньше пятна когерентности не искажают пучок, но уменьшают его интенсивность. При этом появляется рассеяние в незеркальных направлениях.

Самоорганизация магнитных наночастиц и сополимера

Spin-coating
(нанесение пленки при
вращении подложки)



После отжига пленка разделяется
на n ламелл с периодом L .

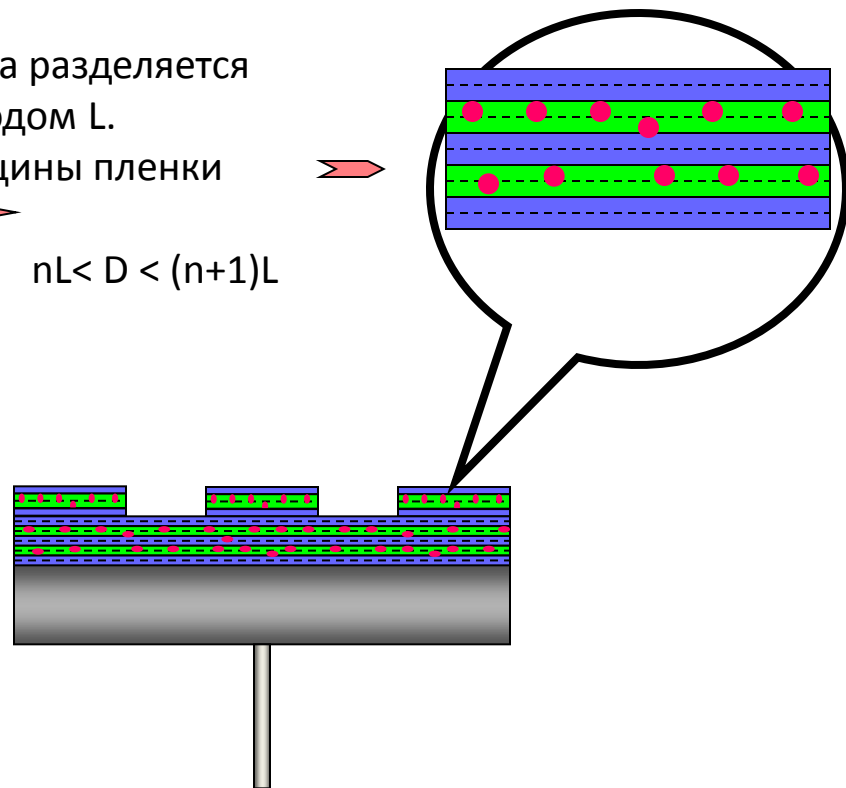
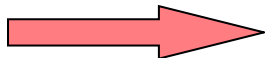
Для начальной толщины пленки

$$D = nL \pm \delta$$



$$nL < D < (n+1)L$$

Самоорганизация
пленки
после отжига



PBMA - A PS - B
Period L (AB-BA)

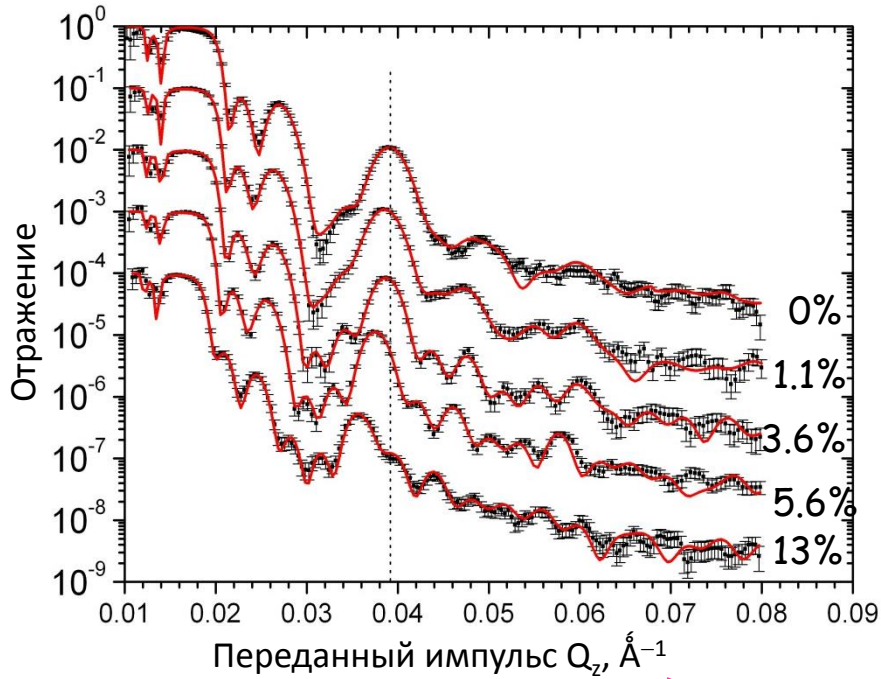
Polybutylmethacrylate (PBMA)
Polystyrene (PS)

B. Hamdoun, D. Ausserre et al. J.Phys.II France 6 (1996) 493

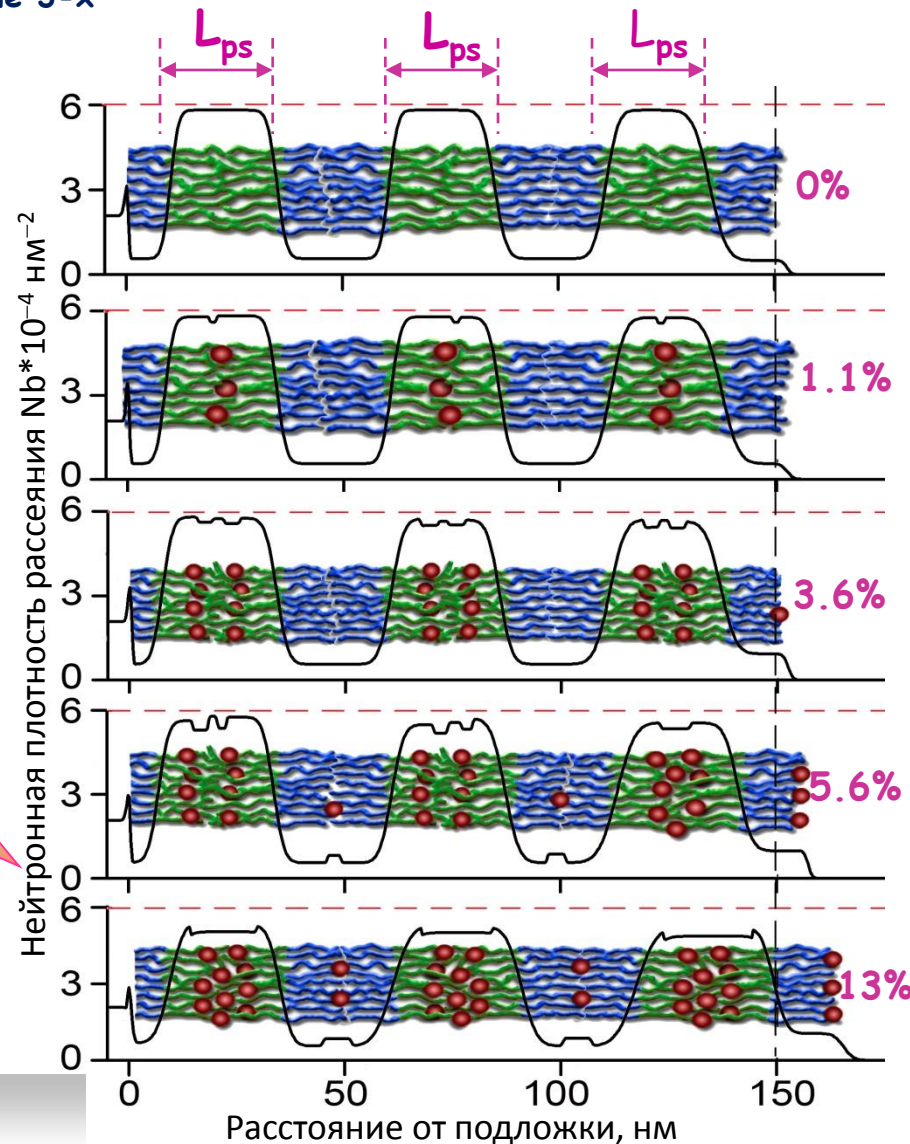
V.Lauter-Pasyuk, H.Lauter, D. Ausserre, Y.Gallot et al., Physica B 241 (1998) 1092

Зеркальное отражение

d-PS-PBMA + Fe₃O₄, отжиг при 160° C в течение 3-х



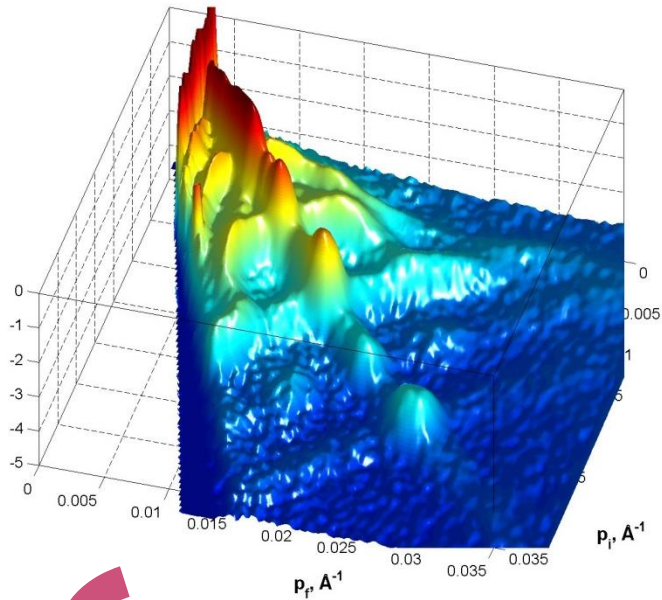
Наночастицы (5 нм)
сегрегируются в PS слоях, чтобы
избежать нежелательного
взаимодействия с доменами
PBMA



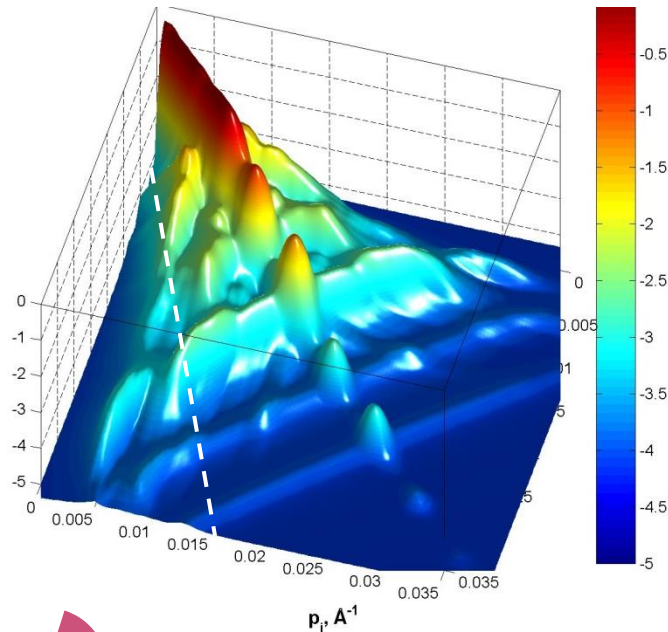
**Новое явление: упорядочение наночастиц
в поперечные нанослои внутри слоистых пленок
на основе сополимеров**

Незеркальное (диффузное) рассеяние

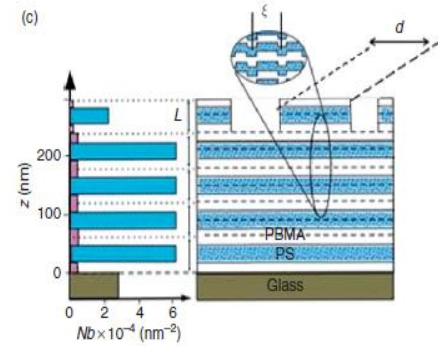
Эксперимент



Модельные расчеты

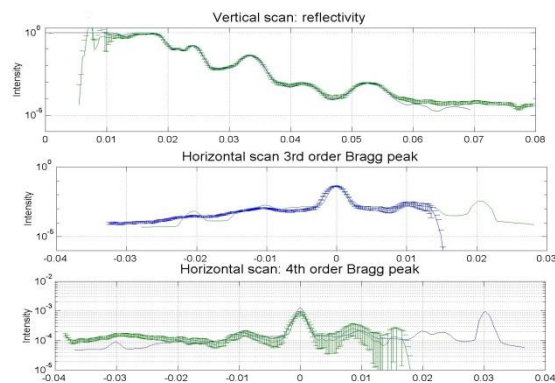


P(d-S-b-BMA)



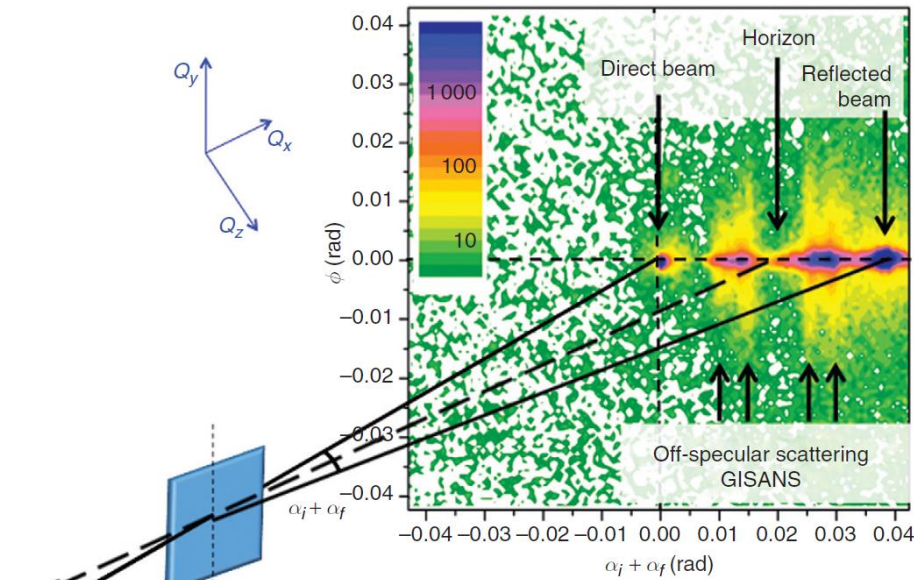
$L = 610 \text{ \AA}$ - период ламеллы
 $\xi = 1500 \text{ \AA}$ -средний продольный размер межплоскостных шероховатостей
 $\sigma = 30 \text{ \AA}$ среднеквадратичный размер шероховатости
 $\sigma\xi = 6$ параметр конформности
 $d = 9000 \text{ \AA}$ диаметр островков

V.Lauter-Pasyuk, H.Lauter, G.Gordeev, P.Muller-Buschbaum, B.Toperverg, W.Petry, M.Jernenkov, A.Petrenko, V.Aksenov, Physica B 350 (2004) e939



Малоугловое рассеяние при скользящем падении

Для многослойного сополимера PS-d-b-PBMA с наночастицами Fe_3O_4 , PS – PolySterene, PBMA – PolyButilMethAcrylate. В данном случае концентрация $\nu = 0\%$



Direct: $\alpha_i + \alpha_f = 0, \phi = 0$

Horizon: линия по поверхности образца

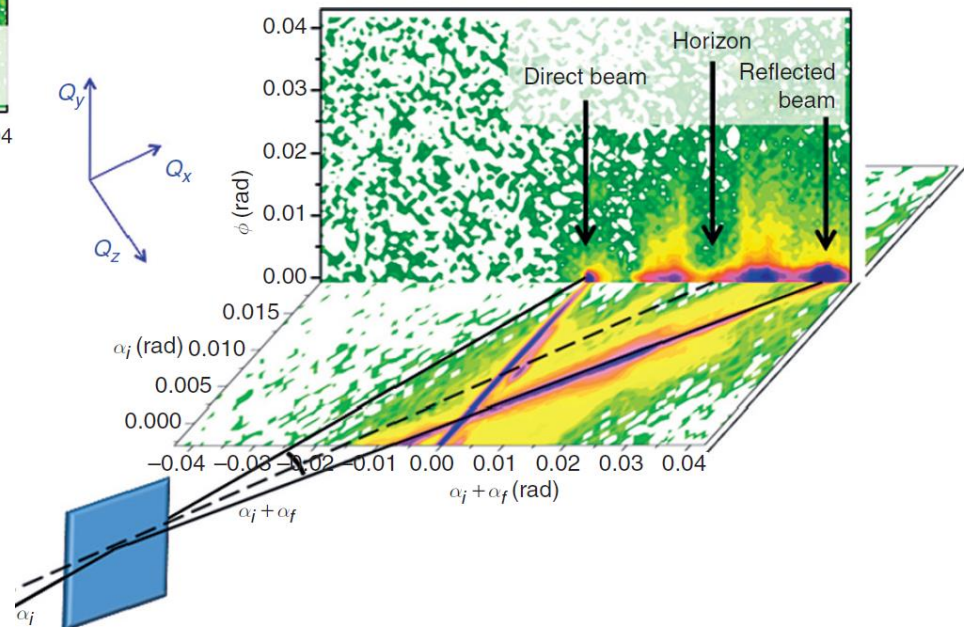
Reflected: зеркальное отражение

Карта интенсивности на позиционно-чувствительном детекторе при $\lambda = \text{const}$ и $\alpha_i = \text{const}$. ϕ – угол между двумя симметричными k_{fi}

2 D карта интенсивности рассеяния при

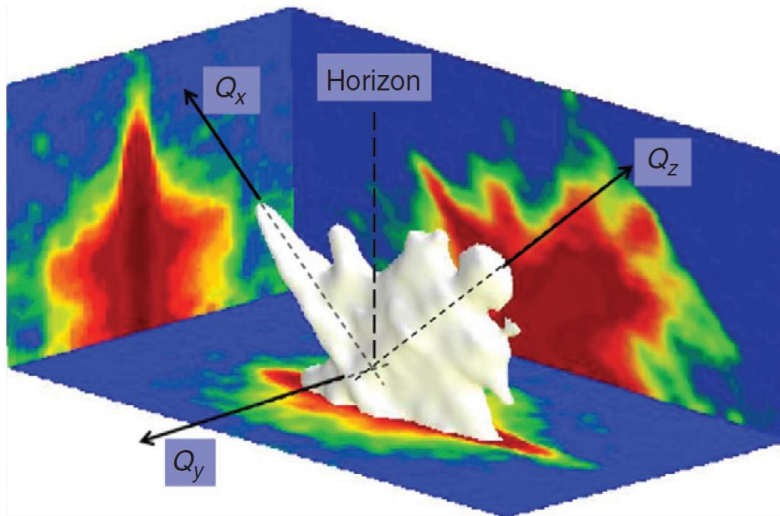
$\phi > 0$ и $\phi = 0$

GISANS появляется вместе с диффузным рассеянием

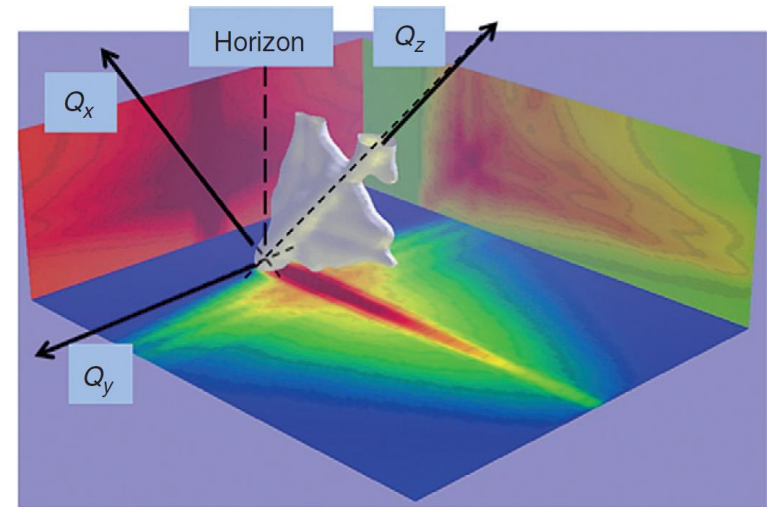


Формирование внутренней структуры в пленке

Сополимер полистерен – полибутилметакрилат (PS-d-b-PBMA)



Фрагмент (белый) измеренного 3D распределения интенсивности в координатах Q_x, Q_y, Q_z для полимера с $v_f = 0\%$. Шкала на осях не указана для качественного обсуждения.



Теоретическая реконструкция фрагмента интенсивности, показанного на рис. слева с модельными параметрами, использованными при подгонке данных на рис. слева. Показаны данные только выше горизонта. Не показан также фон, появляющийся при $Q_z \rightarrow 0$, так как он в теоретическом моделировании не появляется.

Наночастицы инициируют связь осцилляций шероховатостей между интерфейсами, что является важным параметром стабилизации многослойной структуры. Корреляции хорошо описываются моделью капиллярных волн.

3. Резонансное усиление нейтронного волнового поля



Рабочее совещание по синхротронным и нейтронным исследованиям конденсированных сред, Дубна, 1995 г.

Стоячая волна Рентгена
чувствительна и совершенна.
Она тотчас дает ответ,
На месте атом или нет,
И далека ль от идеала
Поверхность ценного кристалла.
(Б.К.Вайнштейн)

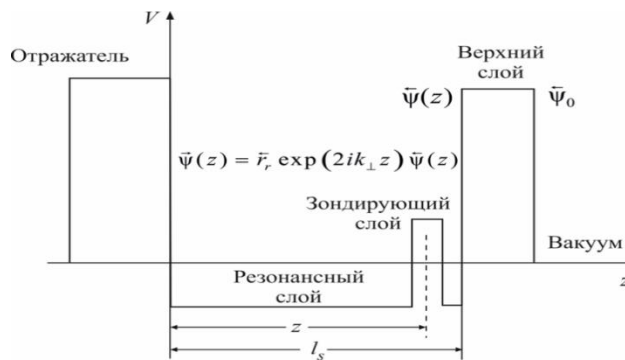
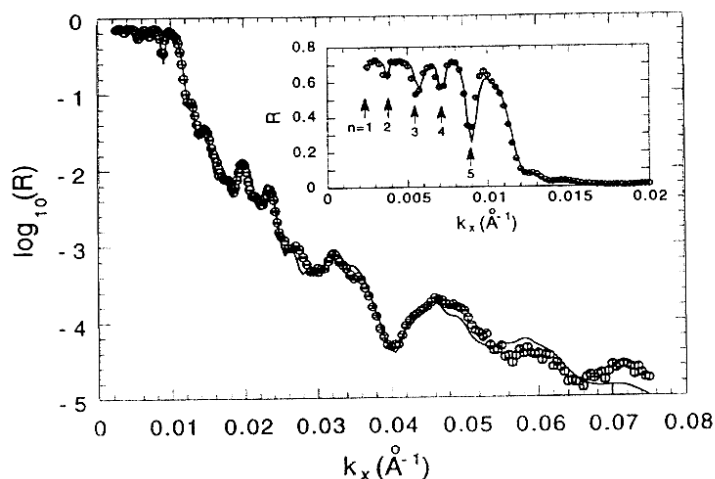
* * *

Knowles J.W. *Нейтронные стоячие волны. Первое наблюдение.* // *Acta Cryst.* 1956. V. 9. P. 61.

Resonance Enhanced Neutron Standing Waves in Thin Films

S.K.Satija et al. (NIST, Gaithersburg) Materials Res. Symp. Proc. Vol. 376. P. 259 (1995)

Условие резонансного усиления

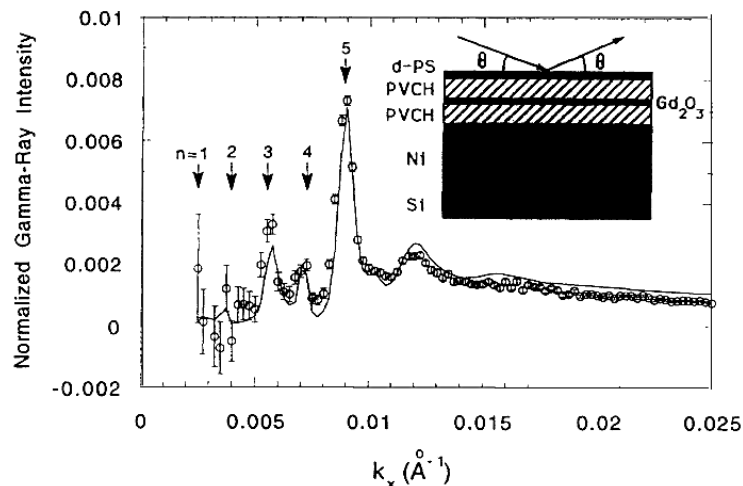


$$k_{\perp} l_s + \varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi n$$

Фактор усиления

$$\eta_{\max} \approx \frac{|t|^2}{(1-|r|)^2}$$

Оптический потенциал для генерации стоячих волн при полном отражении.

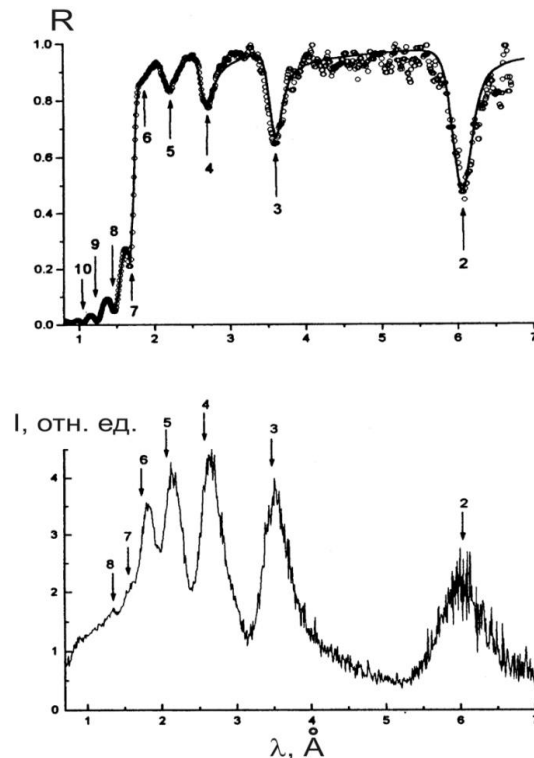
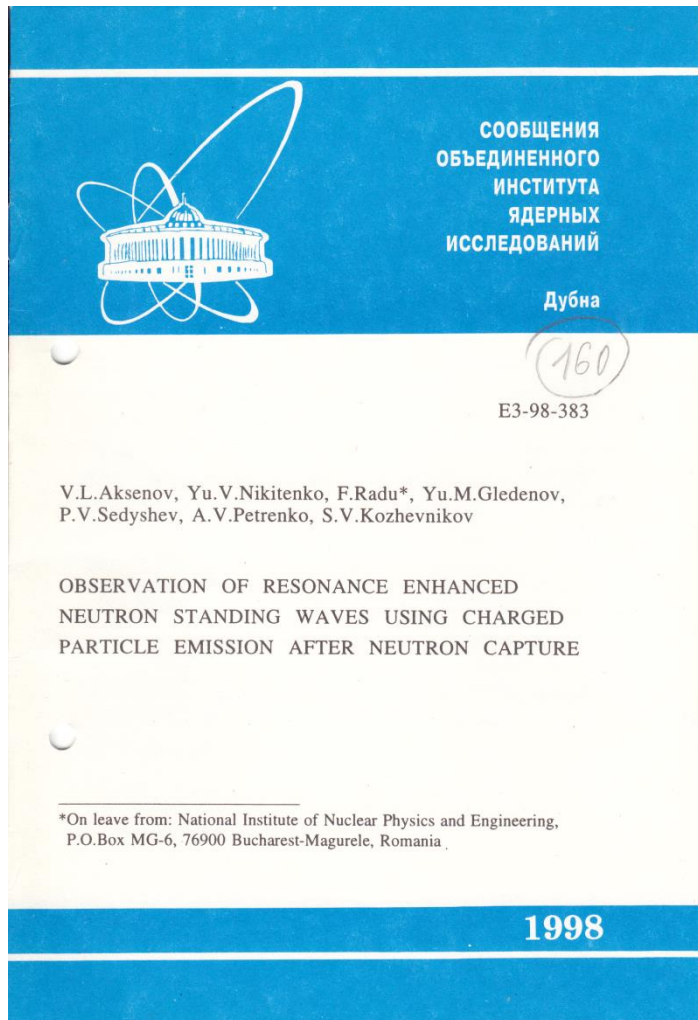


При формировании стоячей волны у волновой функции нейтрона появляются фиксированные в пространстве максимумы и минимумы, параллельные границам раздела.

Поглощающий нейтроны тонкий слой в области максимума стоячей волны заметно ослабляет нейтронный пучок и увеличивает выход продуктов ядерной реакции.

Аксенов В.Л., Игнатович В.К., Никитенко Ю.В. *Нейтронные стоячие волны в слоистых системах.* Кристаллография. 2006. Т. 51. № 5. С. 23–43.

Резонансное усиление вторичного излучения



Вверху: зависимость от длины волны нейтронов λ коэффициента отражения зеркально отражённых нейтронов $R(\lambda)$, точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчёт. Внизу: экспериментальная зависимость от длины волны нейтронов λ интенсивности счёта альфа частиц и тритонов $I(\lambda)$, образованных захватом нейтронов ядрами изотопа ${}^6\text{Li}$ ($\sigma = 945$ барн).

Никитенко Ю.В., Петренко А.В., Гундорин Н.А., Гледенов Ю.М., Аксенов В.Л. *Изотопно-идентифицирующая рефлектометрия нейтронов*. Кристаллография. 2015. Т. 60. № 4. С. 518–532.

Резонансное усиление поляризованной В.Ф.

Reprinted from

PHYSICA B
CONDENSED MATTER

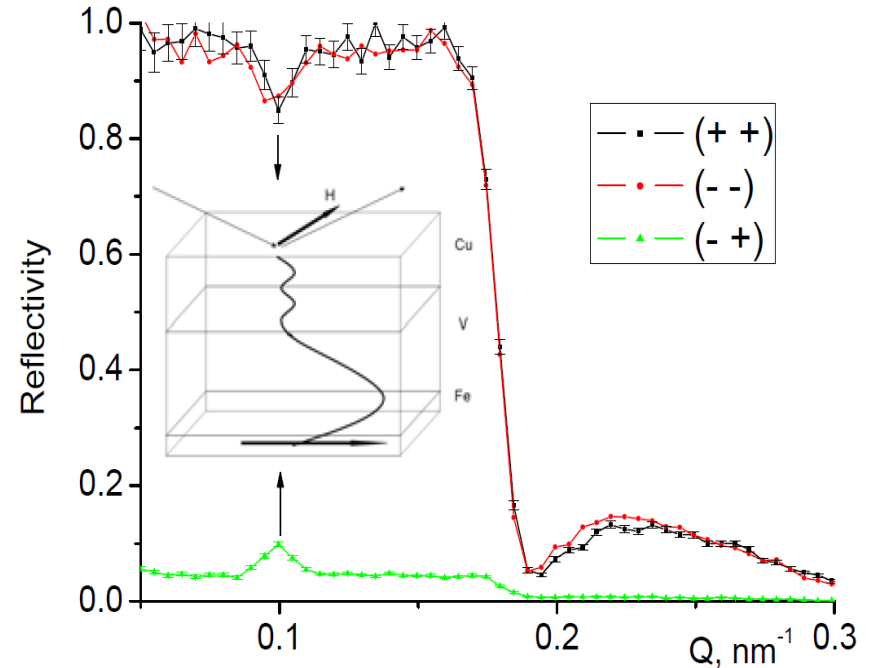
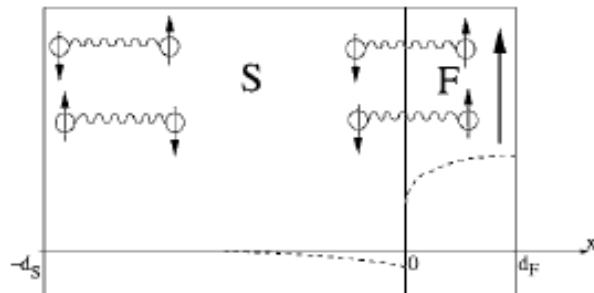
Physica B 267-268 (1999) 313-319

Neutron standing waves investigations with polarized neutrons

V.L. Aksenov, Yu.V. Nikitenko*

Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

Inverse proximity effect

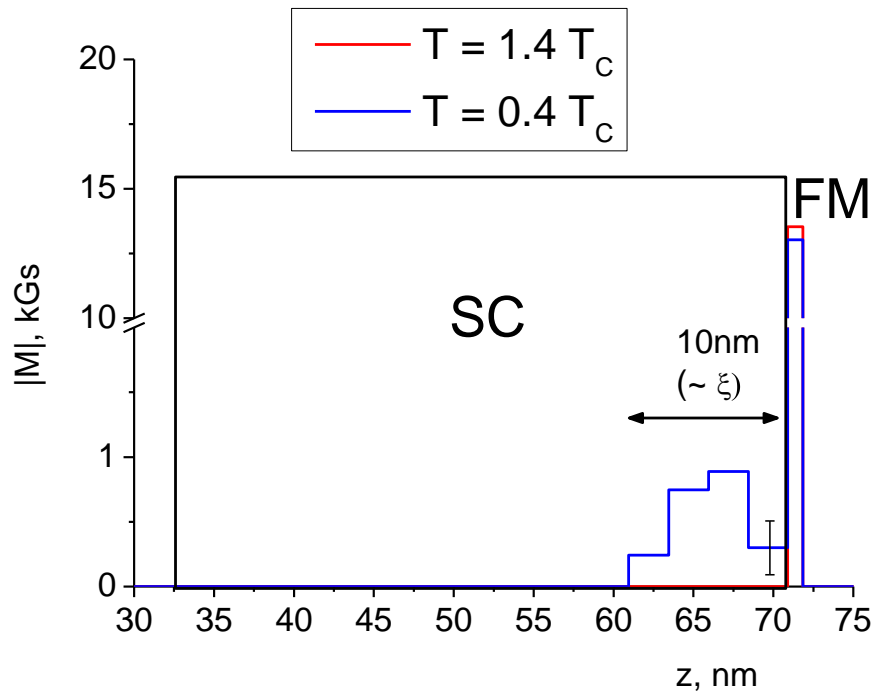


Коэффициент отражения без переворота
спина и с переворотом для тонкой
пленки Cu/V/Fe. Peculiarities of magnetic
states in FM/SC heterostructures due to the
proximity effects. J. of Physics: Conf. Series
211 (2010) 012022. (Yu. Khaydukov et al.)

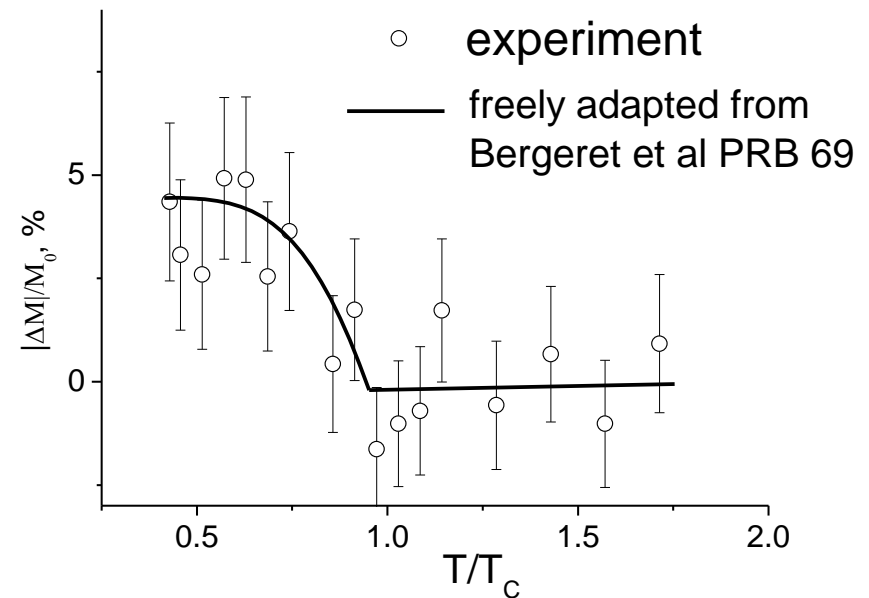
Обратный эффект близости в СТ/ФМ структуре

Cu(33nm)/V(40nm)/Fe(1nm)/MgO (Ю.Н. Хайдуков и др., 2010)

Профиль намагниченности



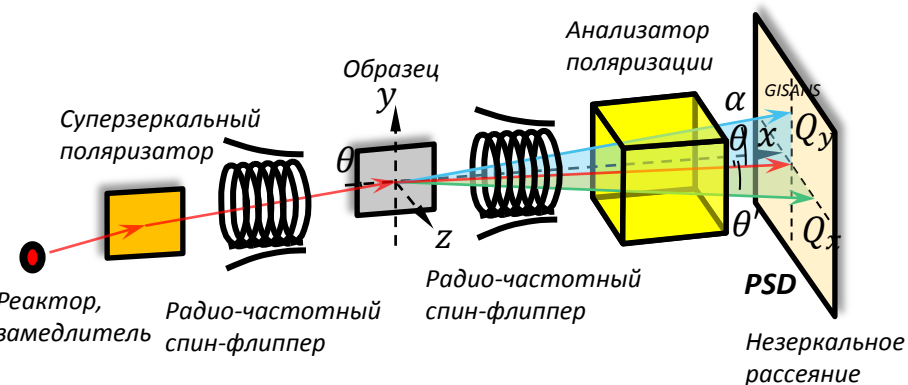
Зависимость намагниченности от температуры



В СТ слое наблюдается наведенная намагниченность в результате влияния магнитного слоя на сверхпроводящее состояние

Регистрация вторичного излучения на спектрометре РЕМУР

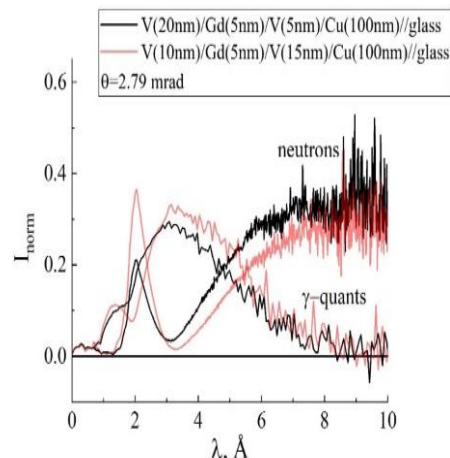
Схема спектрометра РЕМУР на реакторе ИБР-2



Канал регистрации гамма-квантов



Канал регистрации гамма-квантов и позиция образца



Коэффициенты отражения нейтронов и гамма-квантов

Каналы регистрации заряженных частиц и поляризованных нейтронов

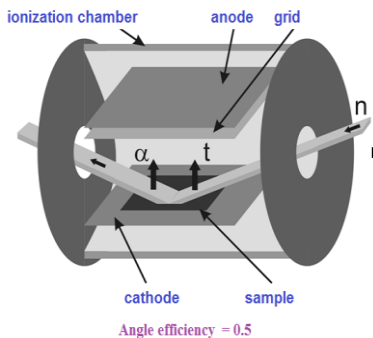
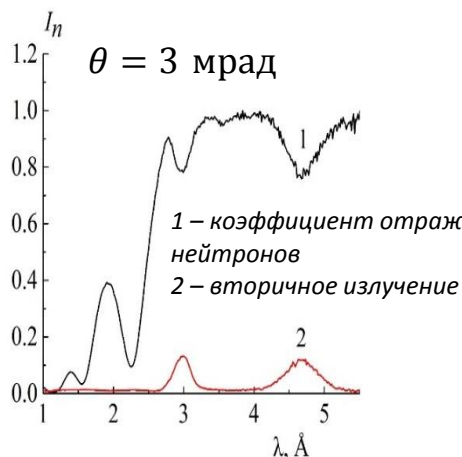
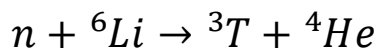
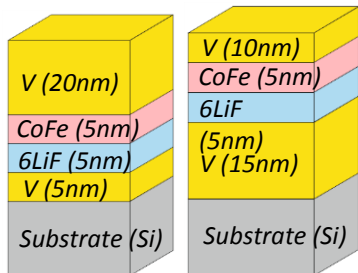
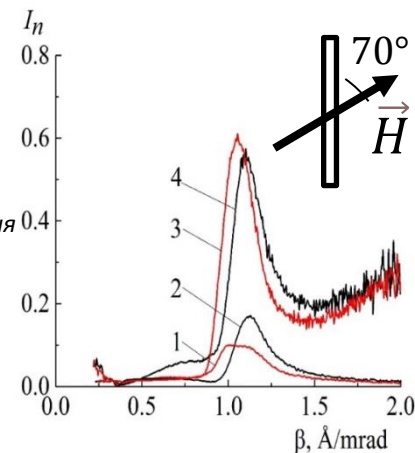


Схема измерений



Коэффициент отражения нейтронов и спектр заряженных частиц



1, 2 – заряженные частицы
3, 4 – нейтроны с переворотом спина

4. Итоги

Диссертации

Кандидатские:

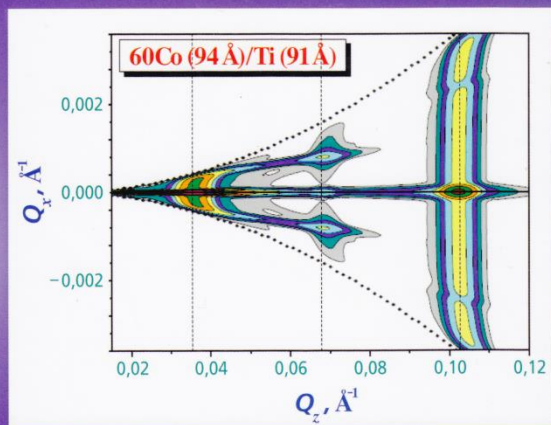
В.В.Пасюк, Л.П.Черненко, В.И.Боднарчук,
С.В.Кожевников, К.Н.Жерненков, М.Н.Жерненков,
Ю.Н.Хайдуков

Докторские:

Ю.В.Никитенко, С.В.Кожевников

Ю. В. НИКИТЕНКО
В. Г. СЫРОМЯТНИКОВ

РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ



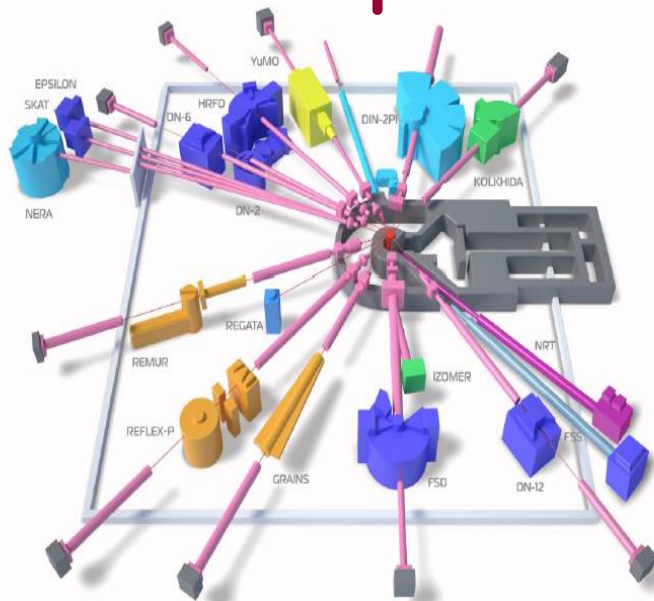
КЛАССИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТСКИЙ
УЧЕБНИК

В. Л. Аксенов, А. М. Балагуров

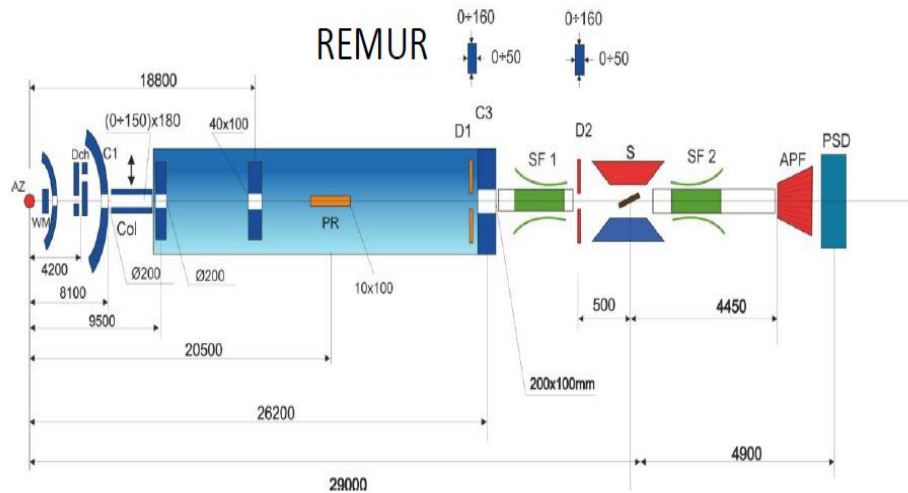
ОСНОВЫ НЕЙТРОНОГРАФИИ



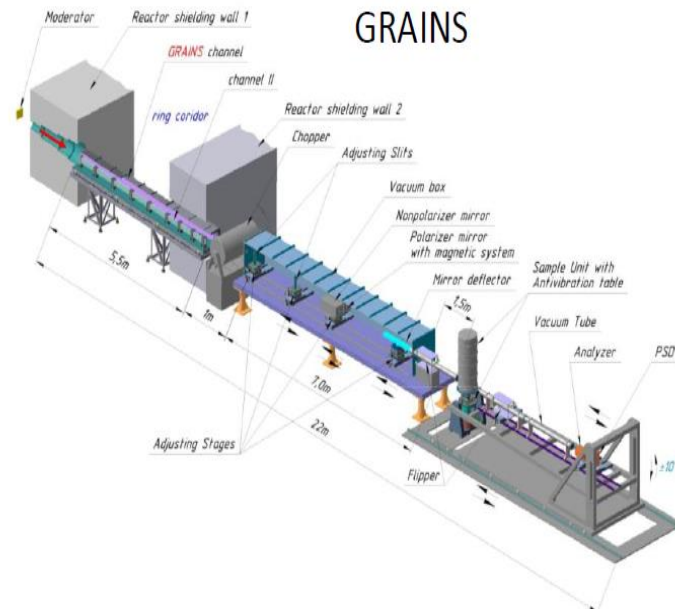
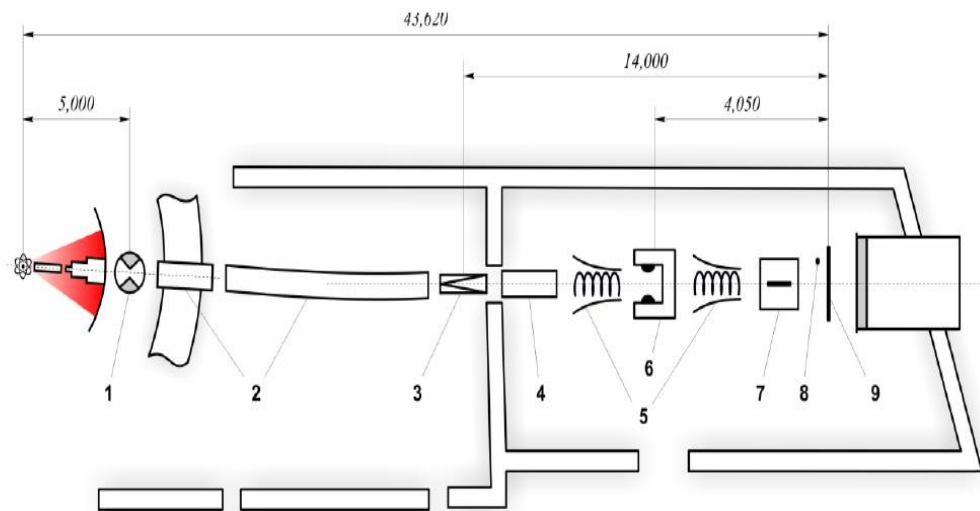
Рефлектометры на реакторе ИБР-2



REFLEX



REMUR



GRAINS

5. Направления развития

1. Рефлектометры на реакторе Нептун (В.Д. Жакетов)

№.	Спектрометр	Назначение спектрометра	Замедлитель
1	Высокопоточный рефлектометр стандартного типа	Магнитная структура бислоёв и мультиструктур; Магнитная и ядерная структура поверхности и тонких магнитных слоёв $\Phi=10^8$ н/с/см ² $\Delta Q/Q=10^{-2}\div 10^{-1}$	20 К / 300 К
2	Рефлектометр для исследования жидкости с горизонтальной геометрией	Свободная поверхность жидкостей, магнитные жидкости, биологические системы, полимерные плёнки $\Delta Q/Q=10^{-2}\div 10^{-1}$	20 К / 300 К
3	Рефлектометр низкочастотной динамики	Диффузия и колебания макромолекул и кластеров на поверхности и в слоях структуры $\Delta Q/Q=10^{-1}\div 0.5$ $\Delta E=1\div 10$ пэВ ~кГц	20 К / 300 К
4	Рефлектометр высокого разрешения с регистрацией вторичного излучения	Магнитная и ядерная структура единичной границы раздела слоистой структуры $\Delta Q/Q=10^{-3}\div 10^{-4}$	20 К / 300 К

$$\delta\theta = (s_1 + s_2)/l \quad \delta\lambda/\lambda \sim \tau/L$$

Нужен поток в 10 раз больше, чем на ИБР-2

Новые методы (пример)

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-2007-178

На правах рукописи
УДК 538.97

ЖЕРНЕНКОВ
Михаил Николаевич

РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ
С ЛАРМОРОВСКОЙ ПРЕЦЕССИЕЙ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированного
состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2007

- Угловое кодирование с ларморовской прецессией нейтронов, основанное на комбинации нейтронной рефлектометрии и нейтронного резонансного спин-эха. Позволяет выйти за рамки борновского приближения искаженных волн.
- Ларморовская псевдо-прецессия позволяет определять абсолютное направление вектора намагниченности в плоскости пленки, что невозможно в традиционной рефлектометрии.

2. Фундаментальные вопросы нейтронной оптики



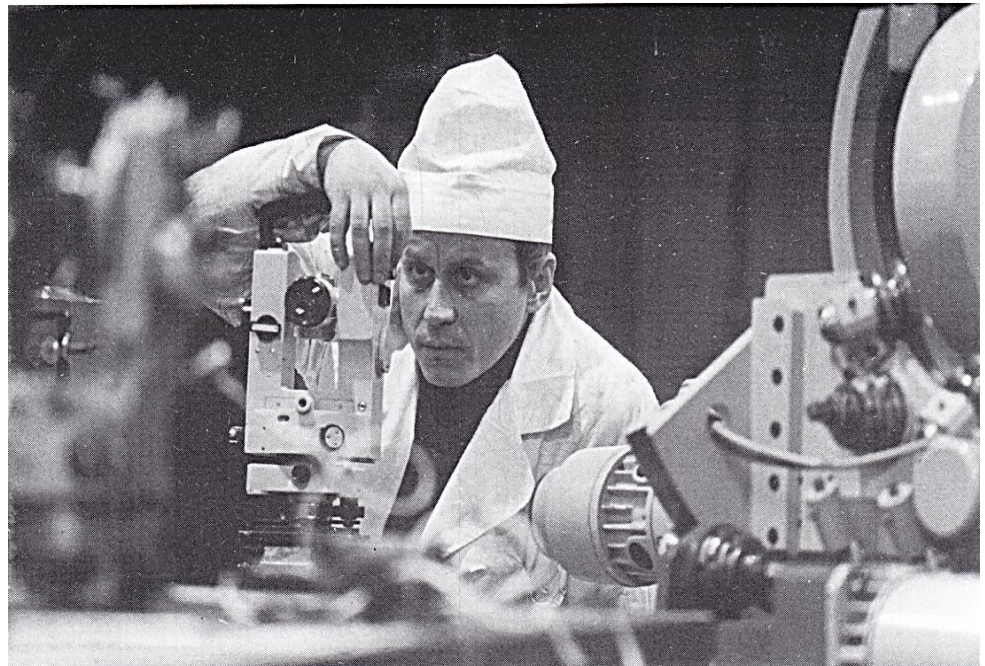
Владимир Казимирович Игнатович
(17.08.1937 – 14.09.2020)

Korneev D.A., Bodnarchuk V.I., Yaradaikin S.P., Peresedov V.F., **Ignatovich V.K.**, Menelle A., Gaehler R. *Reflectometry studies of the coherent properties of neutrons* // Physica B. 2000. V. 276–278. P. 973–974.

Корнеев Д.А., **Игнатович В.К.**, Ярадайкин С.П., Боднарчук В.И. *Отражение нейтронов от потенциалов с размытыми границами*. Препринт ОИЯИ 34-2002-181. Дубна, 2002.

Из дневника Д.А.Корнеева (1974 г.)

«Мы не хотим получать ерундовые задачи ... Мы мечтаем о сверхзадачах и чтобы, если справимся, – гордиться этим всю жизнь».



Дмитрий Анатольевич Корнеев
(8.03.1946 – 22.01.2002)

Благодарю

за внимание

Рефлектометр ГРЭЙНС

Исследованы температурные зависимости (диапазон 15 – 150 °С) структуры тонких пленок полимерных нанокомпозитов (полистирол –фуллерен C₆₀/C₇₀ с низким, до 1 масс. %, содержанием наночастиц) в окрестности температуры стеклования полимерной матрицы).

Для пленок с фуллереном C₆₀ температура стеклования композитной пленки понижается в сравнении с известным значением для чистого полимера в объеме.

Для пленок с фуллереном C₇₀ отклонение от стандартного поведения при высоких температурах указывает на частичную деградацию пленки.

Таким образом, симметрия взаимодействия нанопримесей в композите (этим принципиально различаются два вида фуллерена C₆₀ и C₇₀) является существенным фактором, определяющим его температурную устойчивость.

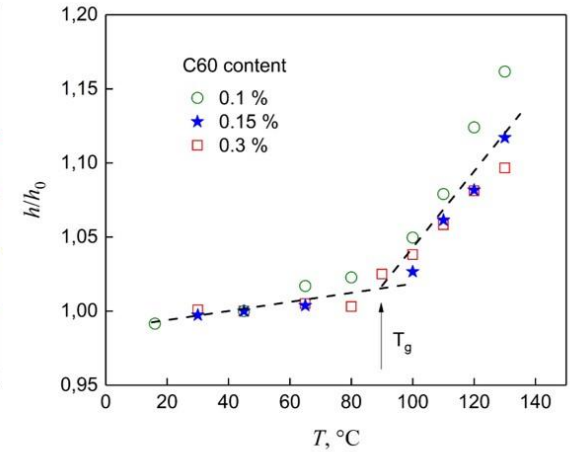
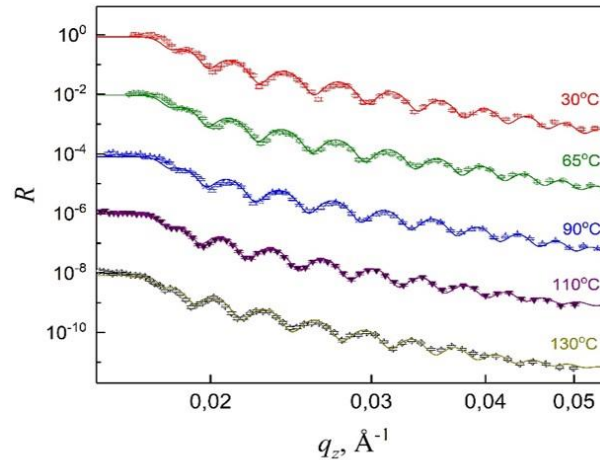


Рис. 22. Определение температуры стеклования композитных полимерных пленок (d-полистирол/фуллерен) с помощью нейтронной рефлектометрии.

Слева – кривые зеркального отражения для тонкой пленки композита с содержанием фуллерена C₆₀ 0.3 масс. % при разных температурах. Данные получены на рефлектометре ГРЭЙНС, ИБР-2.

Справа – зависимости приведенной толщины пленок для образцов d-полистирол/C₆₀ с разным содержанием фуллерена и разной толщиной начальной пленки, h_0 ($T=45^\circ\text{C}$).

Пунктирными линиями представлены линейные температурные зависимости для коэффициентов объемного расширения до и после температуры стеклования.