

Забываемые методики малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов

или

Что теряют некоторые эксперименты,
не используя
поляризованные нейтроны?

Окороков А.И

Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ КИ

Методики, для которых возможно приложение как
научно познавательное так и **практическое**

ФИЗИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ 2017

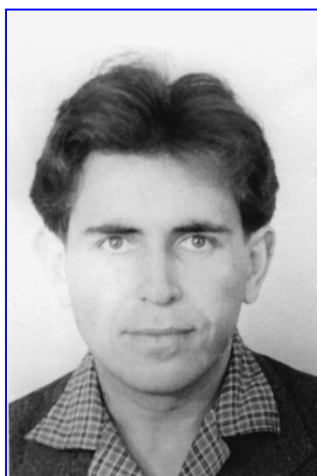


К юбилею Г.М. Драбкина

23 декабря 2017 г., исполнится 95 лет со дня рождения Гильяри Моисеевича Драбкина, основателя исследований с поляризованными нейтронами и организатора нейтронных исследований конденсированного состояния в ПИЯФ, доктора физ.-мат. наук, профессора, Лауреата Государственной премии СССР. Награждён Орденом Великой Отечественной войны II степени и медалями.

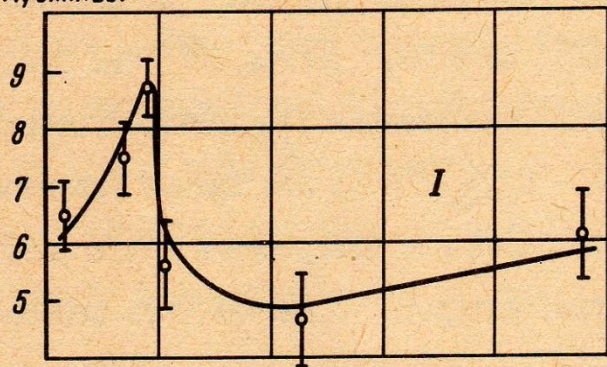


Начало 60-х



Е.И.Забидаров Г.П.Гордеев Я.А.Касман В.А.Трунов А.И.Окороков

N , отн. ед.



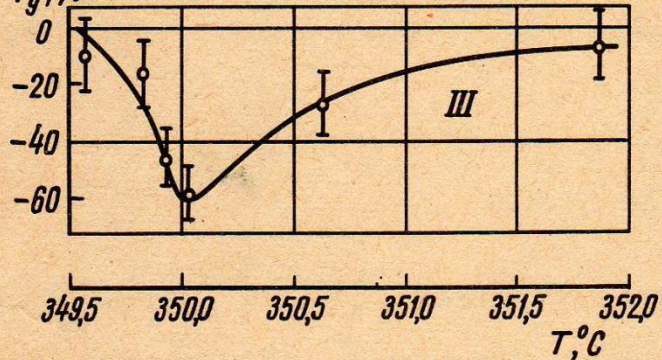
$I(T) \theta = 10.2$ мин

P_y' , %



$P(T) \theta = 0$

P_y' , %



$P(T) \theta = 10.2$ мин

Рис. 2. I - интенсивность нейтронов, рассеянных на угол $\theta = 10,2$ мин; II - поляризация прошедшего пучка нейтронов ($\theta = 0$); III - поляризация нейтронов, рассеянных на угол $\theta = 10,2$ мин

29.12.1959-Физ.Пуск реактора

1960-63 Создание МУР поляризованных нейтронов, **первые тестовые измерения**

1964-ПЕРВАЯ

экспериментальная работа:

[Драбкин Г.М.](#),
[Забидаров Е.И.](#),
[Касман Я.А.](#), [Окороков А.И.](#) Критическое

рассеяние

поляризованных

нейтронов в никеле.

Письма в ЖЭТФ (**1965**)

т.2 в.11 с.541.

Малеев С.В. О рассеянии поляризованных нейтронов в магнетиках вблизи точки фазового перехода. // Письма в ЖЭТФ 2 (1965) 545.
 (Потом он вспомнил, что еще в 1939 г. это вывели Халперн и Холштейн)

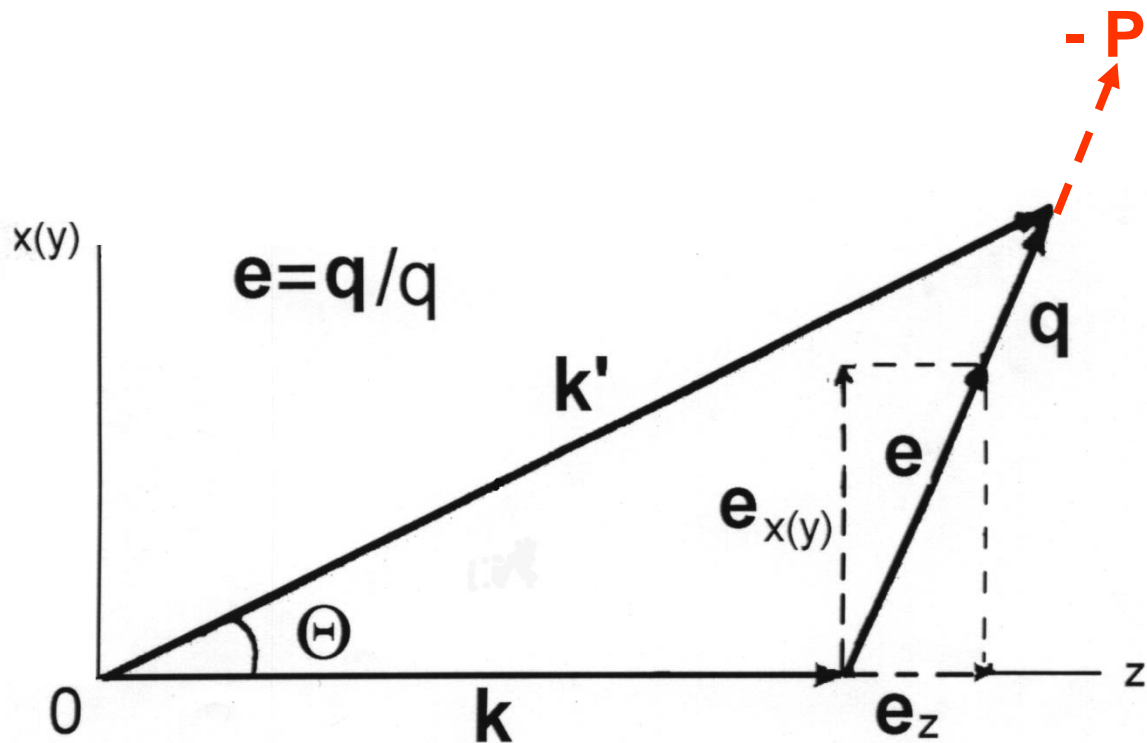
$$\mathbf{P} = -\mathbf{e}(\mathbf{eP}_0),$$

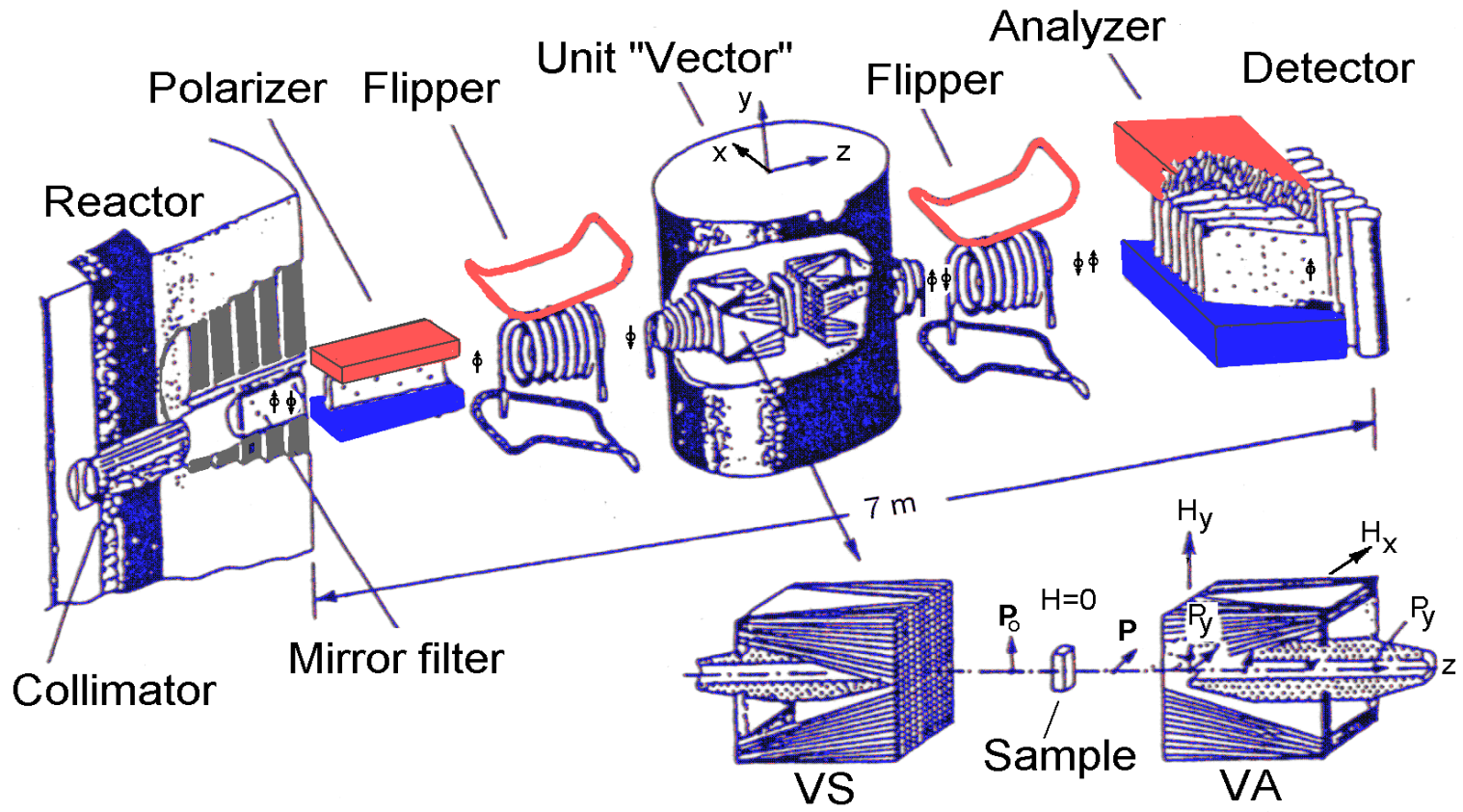
$$e_{x(y)} = 2E\theta / [(2E\theta)^2 + \omega^2]^{1/2} \text{ -упругое рассеяние,}$$

$$e_z = \omega / [(2E\theta)^2 + \omega^2]^{1/2} \text{ - неупругое рассеяние}$$

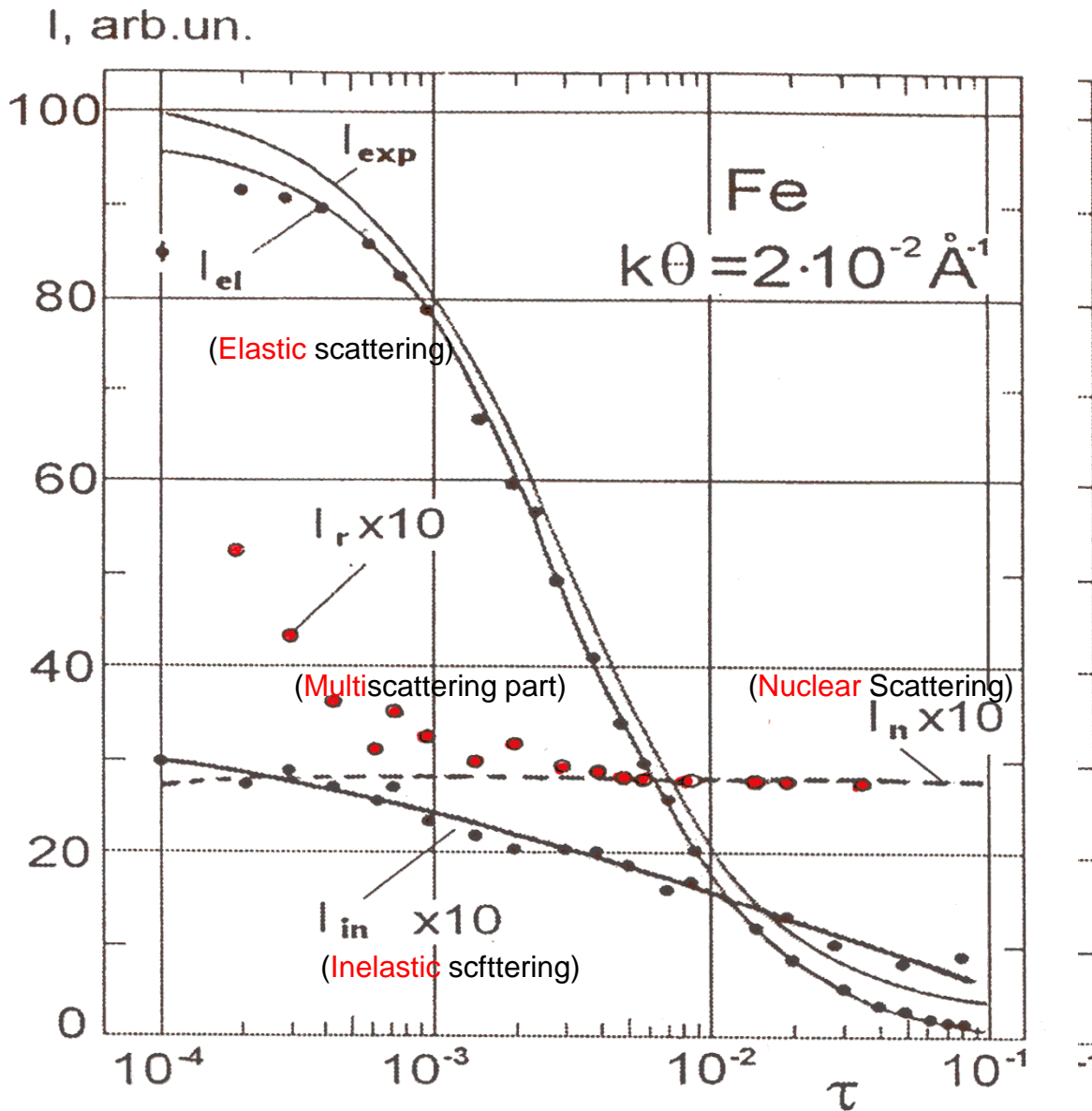
Определить вектор \mathbf{P}
 означает узнать все о
 малоугловом рассеянии
 нейтронов

Нужен 3-х мерный
 XYZ анализ
 поляризации





Г.М.Драбкин, А.И.Окороков, В.В.Рунов, Я.А.Касман и др.



Правило суммы
 $\Sigma P = -1$

а то, что выше
 единицы не
 зависит от P .
 $I = x, y, z$
 Это Фон, Ядерное и
 много кратное
 (Б.П. Топерверг)
 рассеяние и прочее.
 нечувствительное к
 поляризации.

Гипотеза скейлинга

В 60-х годах активизировалась экспериментальная проверка гипотезы подобия различными методами на различных материалах.

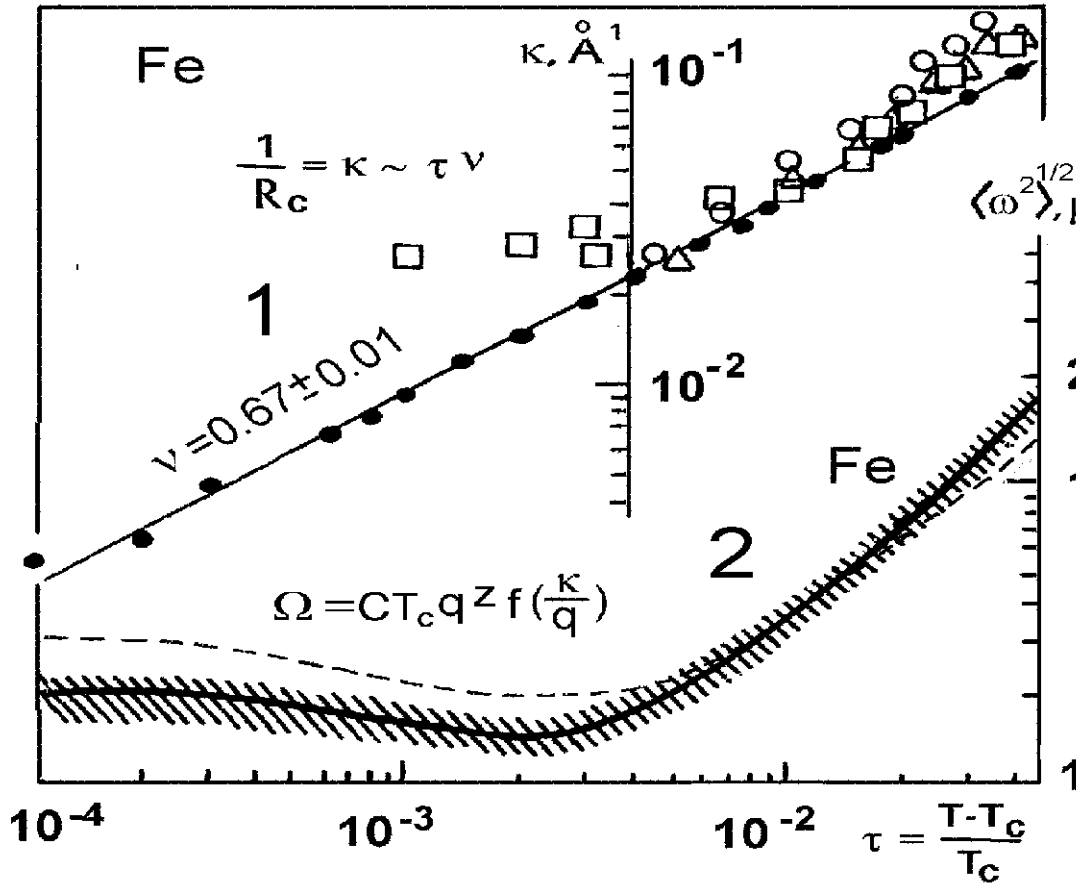
Суть ее в масштабном подобии Флуктуаций параметра порядка в неупорядоченной фазе в зависимости от близости к точке фазового перехода II рода. Термодинамические величины аппроксимируются степенной функцией от температуры с соответствующим критическим индексом

$$X \sim \tau^{\nu}, \text{ где } \tau = (T - T_c) / T_c$$

Теоретически в ферромагнетиках в парамагнитной области критический индекс радиуса магнитных корреляций

$$R_c \sim \tau^{-\nu} \quad \nu = 2/3$$

Для подтверждения этого *наилучший метод – рассеяние нейтронов*
и многие экспериментаторы занялись ЭТИМ



Данные 1 – обратный корреляционный радиус

Теория: $\nu = 2/3$

Данные 2–

скейлинговая Функция Резибуа-Питте

$F(q, \omega) \sim \omega^{-2}$ - общепринято, а асимптотическая теория Малеева предсказывает $F(q, \omega) \sim \omega^{-8/5}$.

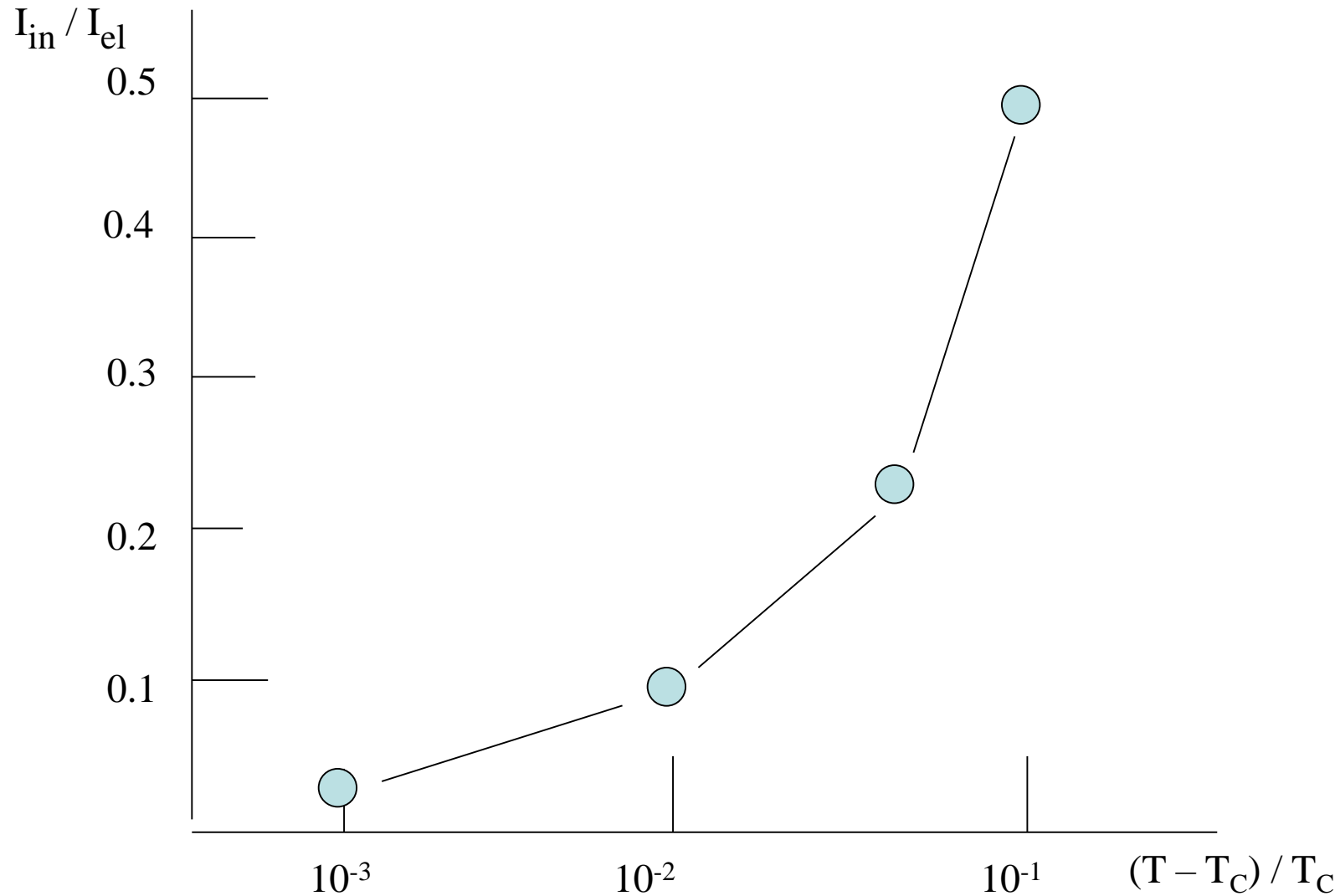
Обычно используется 5-7 полуширин распределения Г. Наши данные более 300 Г.

- - M.F.Collins et. al.
- - D.Bally et al.
- △ - P.Parette, R.Kahn

С различного типа поправок на неупругое рассеяние

3-D анализ, ПИЯФ
- Чисто Упругое рассеяние
- без поправок на другие виды рассеяния

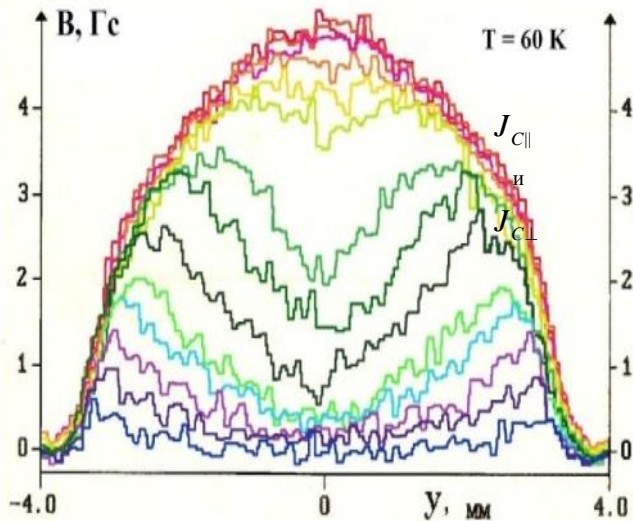
Необходимая поправка на неупругое рассеяние



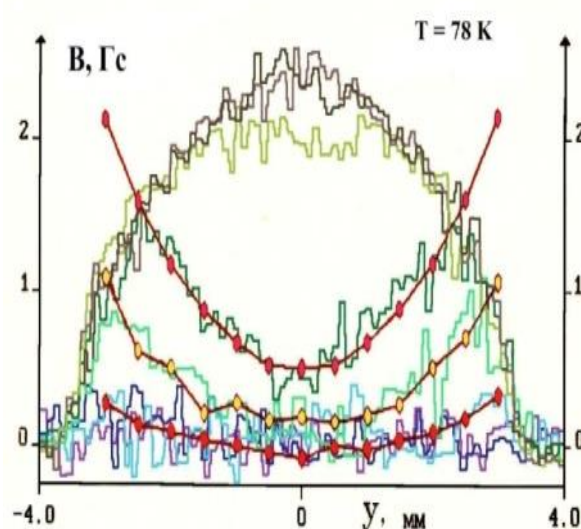
Визуализация магнитного потока в сверхпроводнике

Метод ларморовской прецессии вектора поляризации \mathbf{P}_0 вокруг вектора магнитного потока \mathbf{B} . Измеряемая z -проекция вектора \mathbf{P} была мерой этого поля: $P_z = P_{0Y} \sin \varphi$, $\varphi = \gamma B L / v$ здесь γ – гиромагнитное отношение нейтрона, v – его скорость, а L – размер области поля B .

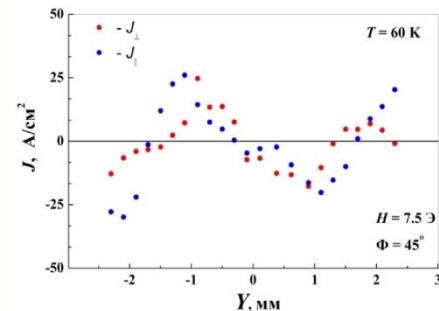
Найдено, что \mathbf{B} возникает на краях образца и при повышении \mathbf{H} концентрируется в центре. Критическое электрическое поле E не равно нулю и при повороте \mathbf{H} суммарный ток $J = J_{\parallel} + J_{\perp}$



Распределение плотности захваченного магнитного потока в керамическом образце YBaCuO после воздействия магнитного поля разной величины при $T = 60$ К, $4.5 \leq H$ [Э] ≤ 16.2 с шагом 0.9 Э. [11].



Распределение потока при выключенном (гистограмма) и включенном (точки) магнитном поле для $T = 78$ К, $H = 0.45; 1.34; 2.23; 3.24; 4.02; 5.4; 6.31; 7.21$ Э [11].

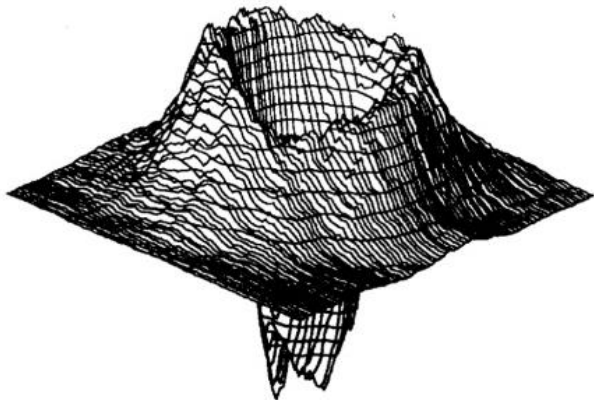


Распределение токов J_{\parallel} и J_{\perp} в образце после поворота поля \mathbf{H} на угол $\Phi = 45^\circ$ и выключения внешнего поля \mathbf{H}

Для развития теории сверхпроводимости аналогичные данные **Просто необходимы**

Интерференционное рассеяние

Для двухкомпонентных образцов с амплитудами рассеяния A_n и A_m полное сечение рассеяния I_t пропорционально $A_n^2 + A_m^2 + 2P_o A_n A_m$. Последний член зависит от поляризации нейтронов и определяет интерференционное рассеяние, которое вычисляется как разность полной интенсивности рассеяния $\Delta I_t = I_t(+P) - I_t(-P)$. Теоретически магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде вихрей **Абрикосова**, но экспериментально увидеть нейтронное рассеяние на них было очень сложно из-за малости магнитной амплитуды A_m . В экспериментах в ИЛЛ удалось увидеть эти фихри, но с **точностью 20-30 %**. Они измеряли разность полного сечения рассеяния при включенном и выключенном магнитном полем H .



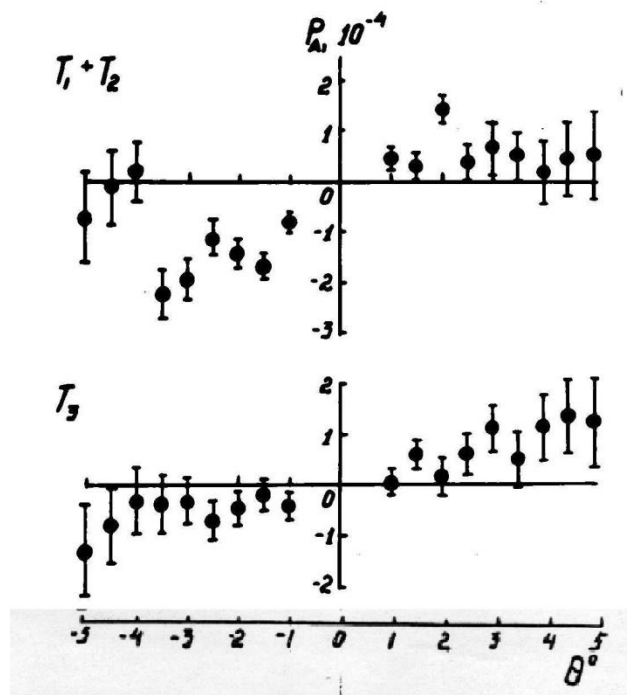
Наши измерения (**Гордеев, Окорок, Рунов**) с поляризацией показали высокую эффективность магнитно-ядерного интерференционного эффекта. Впервые в эксперименте наблюдалось достоверное рассеяние на **вихрях Абрикосова** в ВТСП керамике $YBaCuO$ при включении магнитного поля $H=300$ Э при $T=8K$

Этим методом исследованы многие сплавы с примесным содержанием магнитных атомов, **что имеет прикладное значение.**

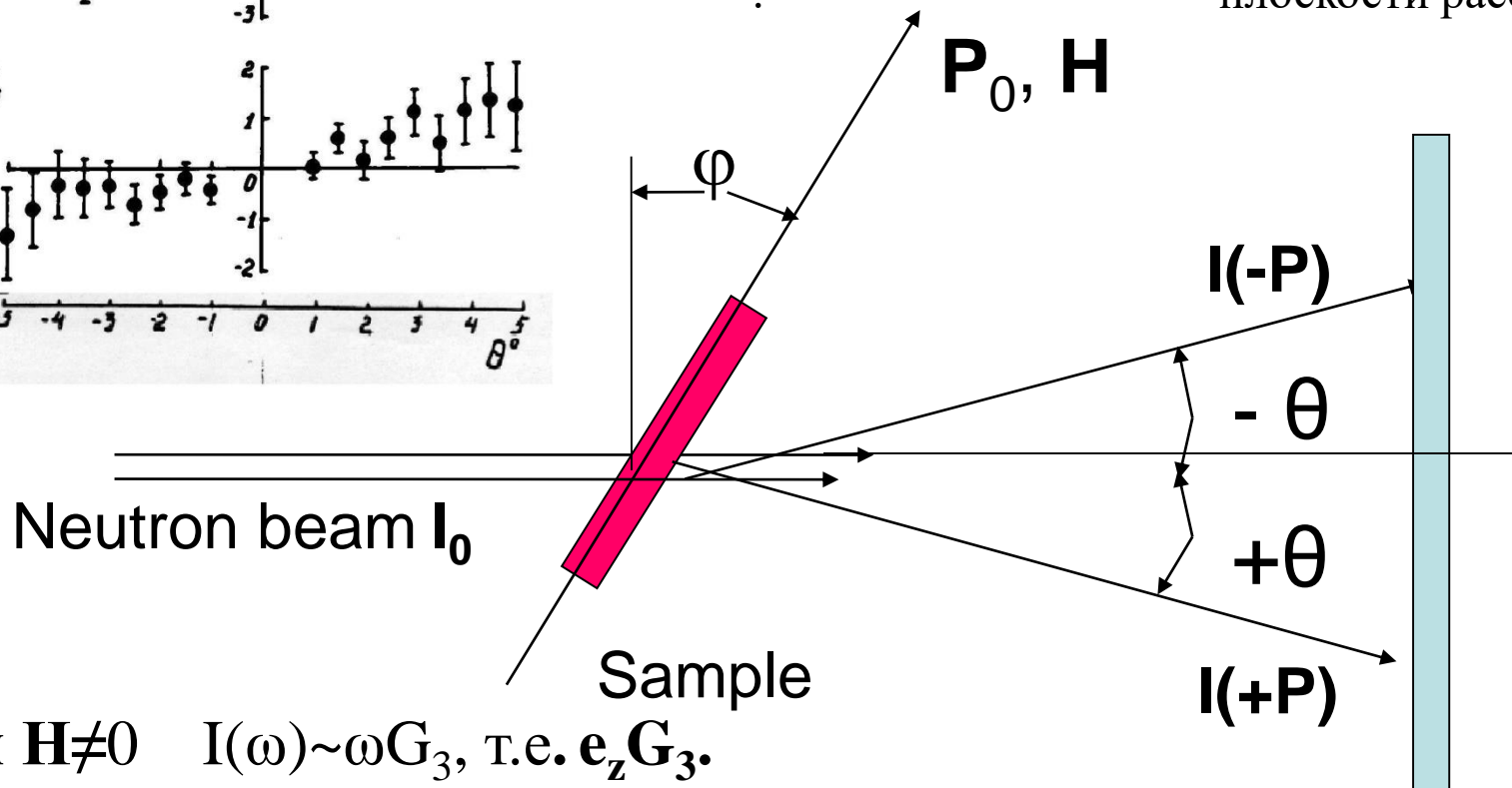
Трех-спиновые динамические корреляции

1977 г. Экспериментальное обнаружение 3-х спиновых корреляций вблизи T_C при $H=0$.

Новая глава в физике магнетизма



При $H=0$ $\mathbf{P}_0 \sim [\mathbf{k}' \times \mathbf{k}_0]$, т.е. перпендикулярна плоскости рассеяния



При $H \neq 0$ $I(\omega) \sim \omega G_3$, т.е. $\mathbf{e}_z G_3$.

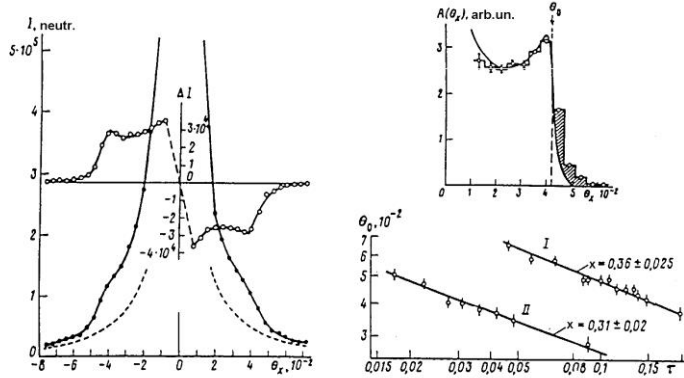
$$(\mathbf{P}_0 \mathbf{e})(\mathbf{e} \mathbf{m}) = P_0 (e_y^2 \cos^2 \varphi + e_z^2 \sin^2 \varphi + \mathbf{e}_y \mathbf{e}_z \sin 2\varphi).$$

Detector

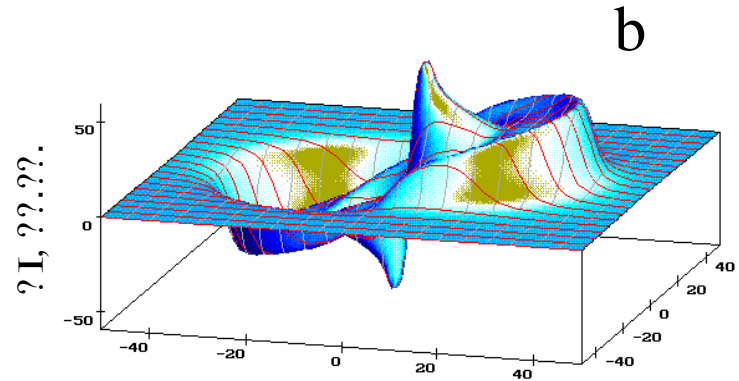
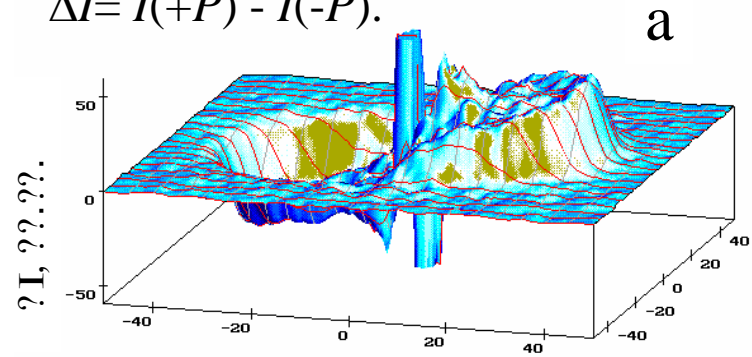
СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ И МАГНИТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ D

Давно замечено, что поскольку нейтрон тяжелее магнона и не может рассеиваться на большие углы, то. спин-волновое рассеяние на магнитных флуктуациях ограничено некоторым углом θ_0 . Были эксперименты по определению этого угла на общем рассеянии неполяризованных и поляризованных нейтронов, но добиться приемлемой точности не удавалось. Теория показывает, что угол отсечки θ_0 непосредственно связан с магнитной жесткостью D и равен отношению массы магнона к массе нейтрона $\theta_0 = \hbar^2/2Dm_n$, что в численном варианте для D означает $D \text{ (мэВ\AA}^2) = 2072/\theta_0 \text{ (мрад)}$. Метод наклонной геометрии с использованием 3-х спиновых динамических корреляций выделяет из общего рассеяния лево-правое асимметричное (ЛПА) по знаку P и θ неупругое рассеяние. С использованием двумерного детектора возможно получить высокую точность параметров спиновых волн.

Антисимметричное рассеяние поляризованных нейтронов на спиновых волнах

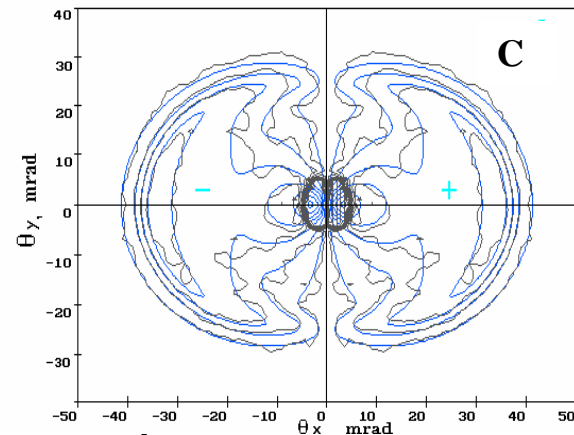


$$\Delta I = I(+P) - I(-P).$$



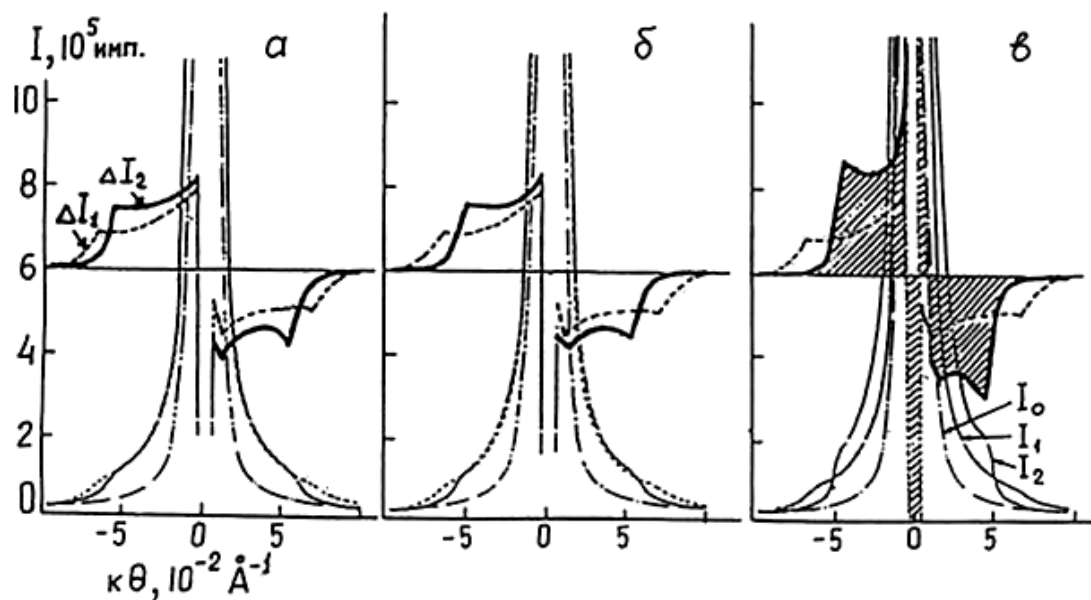
Сложный рельеф большого массива данных рассеяния в координатах двумерного XY-детектора (128x128 ячеек) обеспечивает высокую точность извлеченных параметров, например, для аморфного сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cr}_{10}\text{P}_{18}$:

- жесткость $D = 52.74 \pm 0.05 \text{ мЭВ} \cdot \text{Å}^2$
- дип. константа $\omega_0 \langle S_z \rangle = (50 \pm 3) 10^{-6} \text{ эВ}$,
- Затухание $\Gamma_0 (\kappa R_c) = 25.2 \pm 0.5$.



А.Окороков, А.Гукасов, Б.Топерверг, В.Дериглазов и др.

Прикладные исследования



Угловая зависимость интенсивности рассеяния на спиновых волнах в аморфном сплаве $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cr}_{10}\text{P}_{18}$ при комнатной температуре и $\lambda = 8.8\text{\AA}$.

I_0 — профиль прямого пучка;

$\Delta I = I_+ - I_-$ — антисимметричная часть SW-рассеяния;

I_1 — профиль рассеяния для образца без отжига;

I_2 — профиль рассеяния для термообработанных образцов:

а) — отжиг 250°C , 5 часов;

б) — отжиг 300°C , 80 часов;

в) — уменьшение скорости закалки аморфного состояния.

Договор с ЦНИИ-ЧЕРМЕТ
Оптимизация состава и технологии производства аморфных материалов для различного назначения. Совместная работа длилась несколько лет до перестройки в стране.

По научной части понят **механизм инвара**, который обсуждается более 100 лет, и экспериментально подтверждены некоторые теоретические явления.

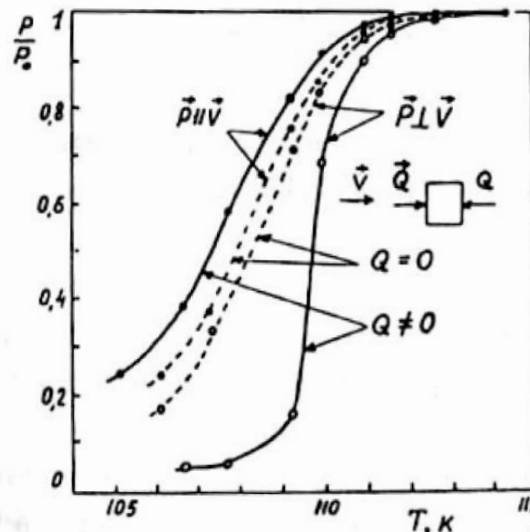
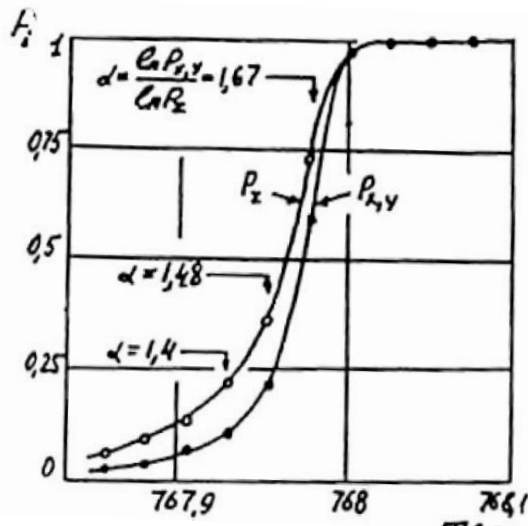
. Анизотропия деполяризации нейтронного пучка

Экспериментально было замечено, что деполяризация раздваивается в зависимости от направления вектора \mathbf{P}_0 **вдоль** скорости нейтронов \mathbf{v} или **перпендикулярно** к ней.

$$P_{||} = P_{||0} \exp(-\sigma NL),$$

$$P_{\perp} = P_{\perp 0} \exp(-3/2 \sigma NL),$$

$$\alpha = [\ln(P_{\perp} / P_{\perp 0})] / [\ln(P_{||} / P_{||0})] = 3/2.$$



Слева зависимость $P_i(T)$ вблизи точки Кюри железа ($T_C = 768^\circ \text{C}$). \mathbf{v} – вектор скорости нейтронов.

Справа зависимость $P_i(T)$ вблизи $T_C = 113 \text{ K}$ сплава Pd-Fe (4ат.%) без нагрузки ($Q=0$) и при одноосном сжатии ($Q \neq 0$).

Довольно быстро **В.А.Рубан** теоретически показал, что **отношение логарифмов P_{\perp} к $P_{||}$ равно $\alpha=3/2$ для изотропного магнетика и не равно $3/2$ у текстурированного магнетика.**

В экспериментах Г.П.Гордеева, И.М.Лазебника и Л.А.Аксельрода на сплавах Pd-Fe (4ат.%) было проверено, что при приложении нагрузки величина α может меняться в десятки раз. Это дает возможность определять:

- 1. Произведение размера домена на квадрат его намагниченности,**
- 2. Параметр текстуры (средний квадрат косинуса угла между направлением намагниченности доменов и осью анизотропии),**
- 3. Средний формфактор доменов и т.д. .**

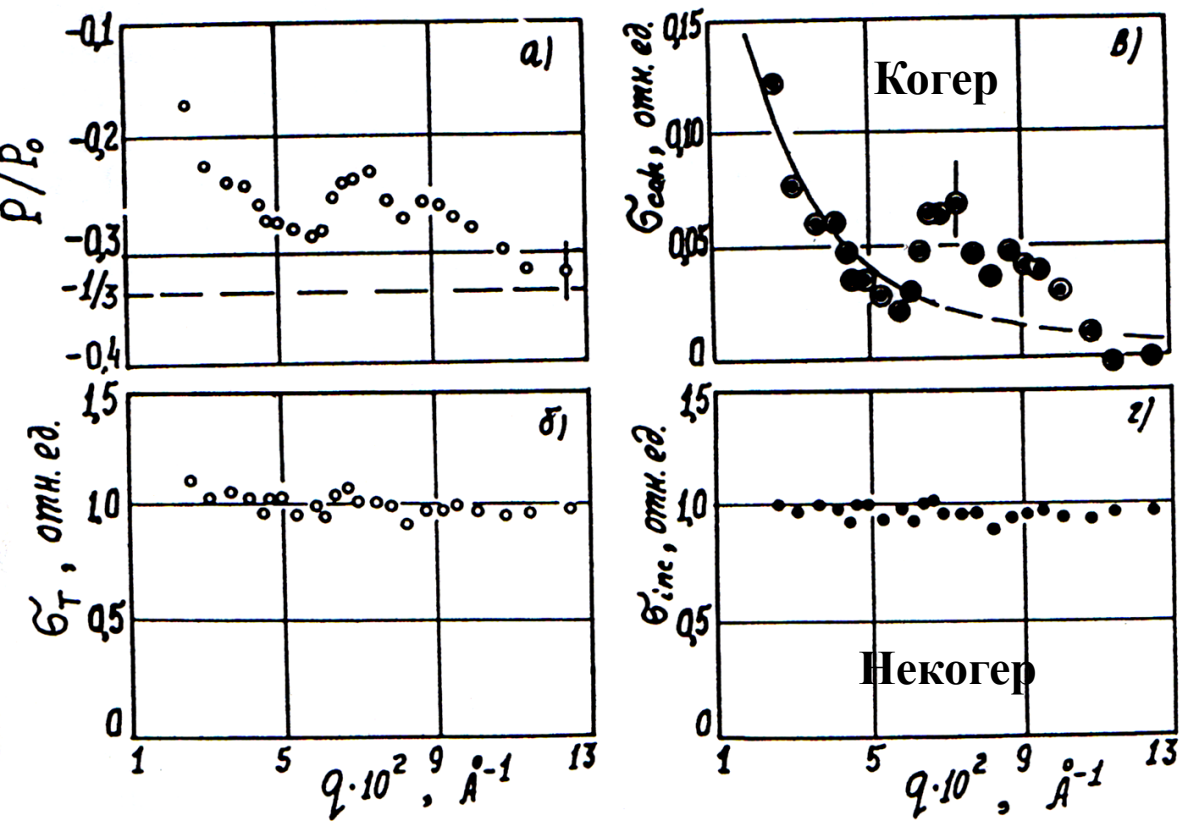
Некогерентное рассеяние

Большинство экспериментов по изучению структуры полимеров и биомолекул проводится на рентгеновском излучении, слабочувствительном к водороду. Более подходящим **для водород-содержащих объектов** являются нейтроны, но они создают большой **фон некогерентного рассеяния**. Эта трудность легко преодолевается использованием поляризованных нейтронов. Из теории известно, что поляризация некогерентного рассеянных нейтронов равна

$$P_{\text{inc}} = - P_0/3$$

Это позволяет выделить отдельно когерентное I_{coh} и некогерентное I_{inc} рассеяние из полной интенсивности I_{ex} с поляризацией P_{ex} .

$$I_{\text{coh}} = (1 + 3 P_{\text{ex}}) I_{\text{ex}} / 4 \quad I_{\text{inc}} = 3(1 - P_{\text{ex}}) I_{\text{ex}} / 4$$



Лебедев В.Т
 Аксельрод Л.А.
 Гордеем Г.П.
 Лазебник И.М.
 Драбкин Г.М.

Рассеяние
 поляризованных
 нейтронов
 в сетчатых
 полимерах.

ФТТ.1985. т 27.11.3351

Рис.26. Импульсная зависимость рассеяния поляризованных нейтронов на сетчатом полимере [40].

- а) — поляризация рассеянного пучка,
- б) — полная интенсивность рассеяния σ_T ,
- в) — расчетная когерентная часть рассеяния σ_{coh} ,
- г) — расчетная некогерентная интенсивность σ_{inc}

Киральность геликоидальных магнетиков

При исследовании киральности геликоидальных магнетиков был обнаружен **переворот спиновой киральности в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ при $x_c = 0.75$** . Аналогичное явление обнаружено в соединении **$Fe_{1-x}Co_xGe$ при $x_c = 0.6$** . Последующие результаты показывают, что исследования сегодня открывают новую страницу в описании магнетизма.

Существование сильного изотропного обменного взаимодействия наряду со слабыми релятивистскими, нарушающими спиновую симметрию, приводят к появлению сложных магнитных структур и новым явлениям.

Хрупкое равновесие, обусловленное этими взаимодействиями, может быть легко нарушено внешними силами: давлением, магнитным полем, химическим замещением и т.д. Эта тема исследований является весьма перспективной как **для техники с высокой чувствительностью, так и для биологии**. Многие сложные биомолекулы обладают киральностью. Есть надежда, что эта тема не останется только в нашем институте.

Ключевые слова

1. 3-d анализ поляризации нейтронов.

Чистые упругое (структура биомолекул и размеры частиц) и неупругое рассеяние (для $F \sim \omega^{-8/5}$ обработки данных с высокой точностью).

2 **Ларморовская прецессия** хорошо известна, но мало используется для изучения магнитных примесей и **совсем не используется с 3-d анализом поляризации** для визуализации внутренних магнитных потоков и критических токов для развития теории сверхпроводимости.

3. **Интерференционное** рассеяние хорошо известно, но мало используется для изучения слабо магнитных примесей.

4. **Проблема некогерентности** (водород-содержащие материалы или элементы с повышенным некогерентным рассеянием, такие как H-80 barn, Nd-9, **Nd₁₄₃-137**, Sm – 39, **Sm₁₃₉ – 137 b**, **Gd – 151**, **Gd₁₅₇ – 394**, Dy -54b.

5. **3-х спиновые корреляции** известны по нашим публикациям, но их использование пока не получило распространения. Особенно **простейшая методика кривой геометрии**, уже имеющая практическое приложение.

6. **Асимметрия деполяризации** и измерение параметров магнитной текстуры

7. **Киральность** и изменение знаков спиновой и структурной киральностей в геликоидальных магнитных системах в зависимости от концентрации элементов и, возможно, от слабых внешних условий: магнитное поле, давление, температура и пр. **Эта тема весьма перспективна для биологии**

Спасибо за внимание

**ЛЮБИТЕ
ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ
НЕЙТРОНЫ !**

**С наступающим новым
2018 годом**

АО

