

50 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЯМ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ВВР-М

А.И. Окороков



Окороков Алексей Иванович – заведующий Отделом исследований конденсированного состояния, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР

Введение

В декабре 1959 года в филиале ЛФТИ (ныне Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН) был запущен исследовательский нейтронный реактор ВВР-М.

Ко времени пуска нашего реактора в США уже работали нейтронные реакторы, и было ясно, что рассеяние нейтронов является одним из наиболее мощных методов изучения структуры и, в особенности, динамики конденсированных сред. При этом, т. к. нейтроны обладают магнитным моментом, они чувствительны к магнитной структуре и магнитным возбуждениям, что отличает их от рентгеновского излучения. Действительно, поляризованные нейтроны позволяют наиболее полно исследовать магнитные свойства вещества, потому что имеется возможность изучения как зависимости рассеяния от начальной поляризации нейтронов, так и ее изменения в процессе рассеяния. Именно поляризованные нейтроны легли в первооснову программы научных исследований конденсированных сред на реакторе ВВР-М, созданной тогда молодым кандидатом физ.-мат. наук, экспериментатором-ядерщиком Г.М. Дабкиным и бывшим аспирантом И.М. Шмушкевича (ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе) С.В. Малеевым, занятым в то время теорией рассеяния поляризованных нейтронов.

С пуском реактора в филиале ЛФТИ Г.М. Дабкиным и С.В. Малеевым были организованы небольшие группы, соответственно, экспериментальная и теоретическая, которые работали как единое целое, подпитывая друг друга задачами и результатами. Этот теоретико-экспериментальный тандем сохранился и до настоящего времени, проводя исследования на высоком уровне.



Основатели твердотельских исследований в ПИЯФ С.В. Малеев и Г.М. Драбкин

Экспериментальная группа сектора ИКС, занимающаяся изучением поляризованных нейтронов (ныне Отдел исследования конденсированного состояния, ОИКС), состояла из выпускников Ленинградского политехнического института и других вузов – Г.П. Гордеева, Е.И. Забидарова, В.А. Трунова, Я.А. Касмана и А.И. Огорокова, и несколько позднее группа пополнилась В.В. Руновым, А.Г. Гукасовым, А.Ф. Щebetовым, И.М. Лазебником, Л.А. Аксельродом, В.Т. Лебедевым и др.



Первая группа исследователей через 45 лет,
”Старая Гвардия” (по словам Г.М. Драбкина)

С 1963 г. научная программа расширилась структурными исследованиями под руководством В.П. Плахтия (Е.И. Мальцев и, несколько позже, О.П. Смирнов, И.В. Голосовский, Ю.П. Черненко, А.В. Ковалев и др.). В это же время С.В. Малеев начал работать с молодыми теоретиками В.А. Рубаном, Б.П. Топервергом, А.В. Лазутой, И.Я. Коренблитом и др. Долгое время Отдел исследования конденсированного состояния включал три нейтронных лаборатории: А.И. Огорокова (ныне лаб. В.В. Рунова), В.П. Плахтия и лабораторию (ныне группа) В.А. Трунова, группу радиационной физики под руководством Р.Ф. Коноплевой и две другие, не нейтронные, лаборатории: И.Д. Лузянина (ныне группа О.В. Герашенко) и Ю.С. Грушко. Ниже представлены нейтронные установки на реакторе ВВР-М для исследования конденсированных сред, созданные методы и техника и кратко обсуждены полученные теоретические и экспериментальные результаты.

На рис. 1 показана схема экспериментальных каналов реактора ВВР-М и размещения научной аппаратуры. Видно, что физика твердого тела ПИЯФ занимает 10 пучковых каналов, но они не эквивалентны. Только 5 из них – нормальные, радиальные – берут начало из бериллиевого замедлителя. Из них пятый канал с установкой «Мембрана» является дефектным из-за застрявшего в нем стального коллиматора с узкой щелью. Остальные 5 пучков созданы на базе тепловой колонны после пуска реактора и имеют почти на порядок меньшую интенсивность.

Поляризованные нейтроны

Уникальные возможности поляризованных нейтронов (в отличие от неполяризованных) связаны с тем, что сечение магнитного рассеяния зависит от взаимного направления намагниченности образца $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M$, направления вектора рассеяния $\mathbf{e} = \mathbf{q}/q$ и вектора начальной скорости нейтронов \mathbf{v} (или волнового вектора \mathbf{k}_0). Существует соотношение между поляризацией и вектором рассеяния $\mathbf{P} = -\mathbf{e}(\mathbf{eP}_0)$, открытым для нас С.В. Малеевым (а еще ранее О. Халперном и М. Джонсоном), а в сечении рассеяния существует псевдовектор $\mathbf{M}_\perp = \mathbf{m} - (\mathbf{em})\mathbf{e}$, описывающий магнитно-ядерную интерференцию. Для чисто магнитного рассеяния был найден псевдовектор $\mathbf{M}_\parallel = (\mathbf{em})\mathbf{e}$ (С.В. Малеев, 1961), а в более высоком приближении, чем борновское, обнаружен псевдовектор $\mathbf{n} = [\mathbf{k}', \mathbf{k}_0] / |\mathbf{k}', \mathbf{k}_0|$ (А.В. Лазута, С.В. Малеев, Б.П. Топерверг, 1977), вдоль которого может быть направлена поляризация при рассеянии на трехспиновых корреляциях. Все эти соотношения использовались и используются в экспериментах с поляризованными нейтронами.

Особенно важным и новым в эксперименте явилось соотношение $\mathbf{P} = -\mathbf{e}(\mathbf{eP}_0)$. Действительно, определив вектор \mathbf{P} , мы сразу знаем направление вектора \mathbf{q} , а его величина легко вычисляется по схеме рассеяния. Таким образом, только измерением \mathbf{P} мы получаем **полную информацию** о процессе рассеяния, а по ее измеренным компонентам P_x , P_y и P_z можно отдельно определить упругое (по P_x и P_y , перпендикулярных оси пучка) и неупругое (по P_z , параллельной оси пучка) магнитное рассеяние, а правило суммы $P_x/P_{0x} + P_y/P_{0y} + P_z/P_{0z} = -1$ позволяет выделять ядерное рассеяние и фон детектора.

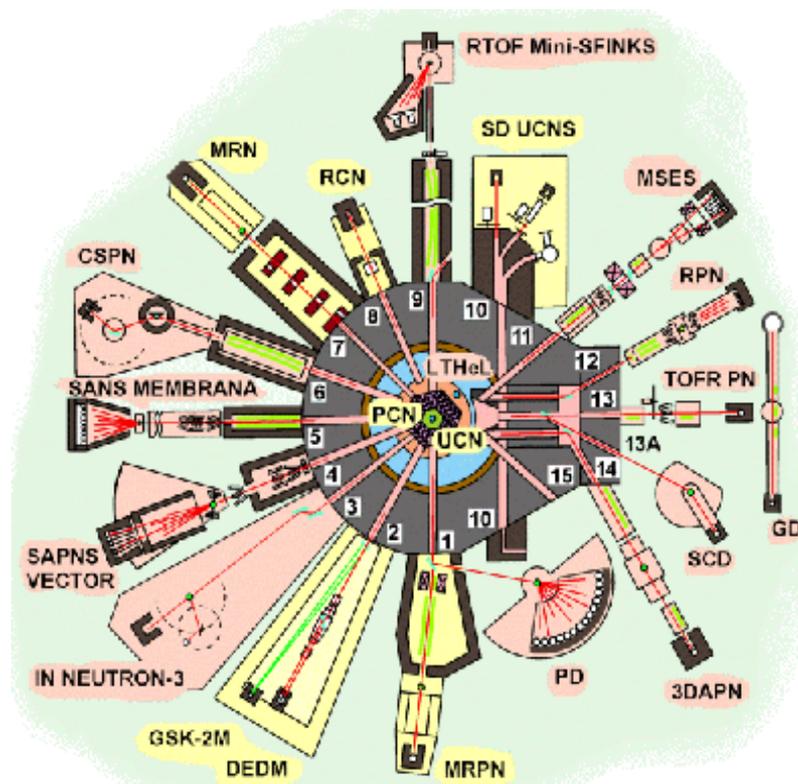


Рис. 1. Схема размещения научной аппаратуры на реакторе ВВР-М:

Приборы для физики конденсированного состояния:

- 48-счетчиковый порошковый дифрактометр для структурных исследований (канал 1);
- Трехосный нейтронный спектрометр "Нейтрон-3" (канал 3 ФТИ);
- Малоугловой дифрактометр "Вектор" (канал 4);
- Малоугловой дифрактометр "Мембрана-2" (канал 5);
- Времяпролетный спектрометр (канал 6);
- Нейтронный обратный порошковый Фурье-дифрактометр (канал 9);
- Спин-эхо-спектрометр тепловых нейтронов (канал 11);
- Рефлектометр поляризованных нейтронов с вертикальной плоскостью рассеяния (канал 12);
- Двухмодовый рефлектометр на поляризованных нейтронах РПН-2М (канал 13);
- Четырехкружный дифрактометр (канал 13А);
- Малоугловой дифрактометр с 3-мерным анализатором поляризации (канал 14);
- Низкотемпературная гелиевая петля НГП (LThel);
- Гамма-дифрактометр (GD).

Приборы для ядерной физики:

- Кристалл-дифракционный монохроматор нейтронов (канал 1А);
- Кристалл-дифракционный фокусирующий спектрометр и установка ДЭДМ (канал 2);
- Механический многороторный монохроматор нейтронов (канал 7);
- Установка для исследования γ -излучений в ядерных реакциях (канал 8);
- Твердодейтериевый источник ультрахолодных нейтронов (канал 10);
- Канал холодных и ультрахолодных нейтронов (PCN, UCN)

Для реализации этих возможностей были созданы методика трехмерного анализа поляризации рассеянных нейтронов (В.В. Рунов, А.И. Огороков, авт. свид. № 408247 от 10.03.1972) и 3-мерный (или векторный) анализатор. Он позволял задавать поляризацию начального пучка нейтронов последовательно по координатным осям X, Y, Z и для каждого направления начальной поляризации измерять компоненты поляризации P_x , P_y и P_z . На рис. 2 показано разложение полного сечения рассеяния на упомянутые выше компоненты с включением и двукратного рассеяния.

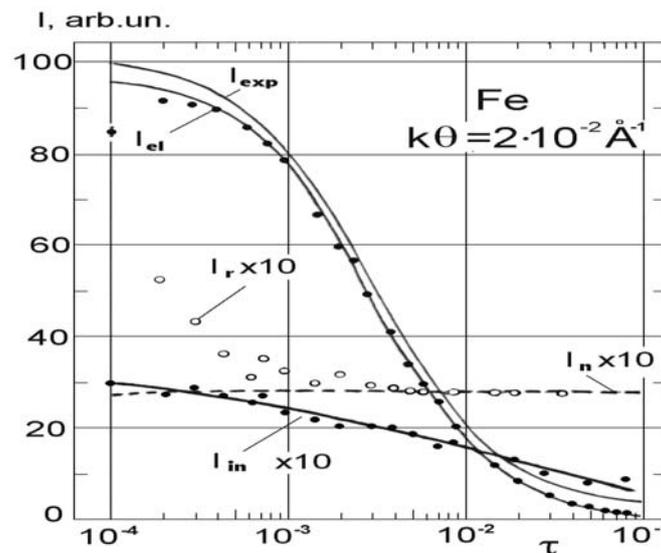


Рис. 2. Температурная зависимость различных частей интенсивности I_{exp} , I_{el} , I_{in} , I_n и I_r (см. текст)

Трехмерным анализом поляризации было исследовано критическое рассеяние в Fe выше T_C с целью проверки появившейся тогда гипотезы скейлинга. Этому вопросу в мире был посвящен ряд работ, но результаты оставляли желать лучшего, т. к. авторы не смогли сделать корректную поправку на неупругий вклад в упругое рассеяние при измерении корреляционного радиуса $R \propto \tau^{-\nu}$, где $\tau = (T - T_C)/T_C$. На рис. 3 показаны сравнительные данные экспериментов Коллинса (o), Балли (□), Паретте (Δ) и нашего (●), который с высокой точностью подтверждает скейлинговый критический индекс $\nu = 0,67 \pm 0,01$ в диапазоне температур до $\tau = 10^4$ (теоретическое значение $\nu = 2/3$). Что касается спиновой динамики, то было установлено отличие динамического формфактора от функции Лоренца в высокочастотном пределе, а динамический критический индекс найден равным $z = 2,617 \pm 0,04$. Ранее было известно, что по деполяризации прямо прошедшего через образец нейтронного пучка, рассматриваемой как суммарный эффект малых поворотов спина в магнитном поле домена, можно изучать размеры магнитных доменов и микронеоднородностей (O. Halpern, M.N. Josephson. Phys. Rev. **55**,

1939, 898). В 1972 г. С.В. Малеевым и В.А. Рубаном (ЖЭТФ **62**, 1972, 416) была создана квантовая теория деполяризации и предсказано новое физическое явление – анизотропия деполяризации нейтронного пучка на магнитноизотропных неоднородностях $A = \ln(P_{x,y})/\ln(P_z) = 3/2$.

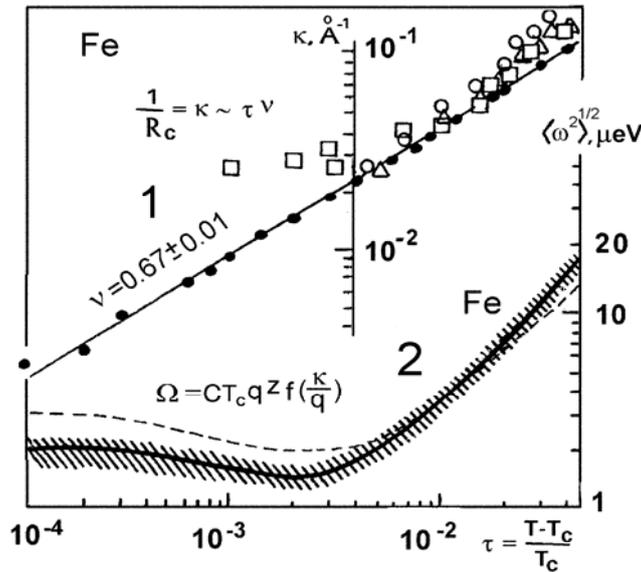


Рис. 3.

1. Обратный корреляционный радиус κ (черные точки).

Для сравнения приведены результаты других экспериментов:

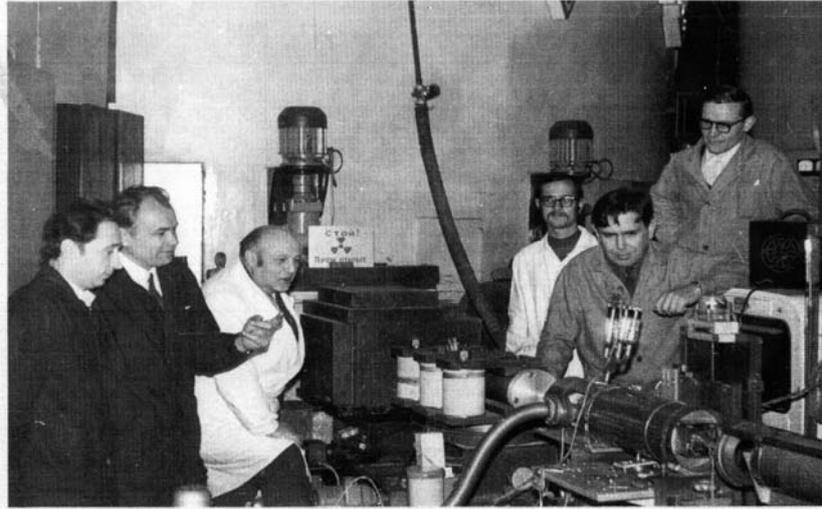
(\circ) – Коллинс, (\square) – Балли, (Δ) – Паретте.

2. Неупругость $R = P_z/(P_x + P_y)$ в единицах $\langle \omega^2 \rangle^{1/2}$ при $\kappa \theta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}^{-1}$.

Заштрихованная область – доверительный интервал для экспериментальных данных. Сплошная линия – подгонка по МНК скейлинг-функции Резибуа и Пиетте (РП) $\Omega(\kappa/q)$ со свободными параметрами. Штриховая линия – расчет с использованием параметров РП

Это явление было подтверждено экспериментально А.И. Огороковым и В.В. Руновым на никеле и в дальнейшем использовалось для аттестации образцов. Дело в том, что если коэффициент анизотропии A отличается от $3/2$, то это значит, что образец имеет магнитную анизотропию, и это дает возможность исследовать текстуру и магнитоэлектрические явления. Большой цикл работ по измерению текстуры промышленных ферритовых образцов был проведен Г.П. Гордеевым и Л.А. Аксельродом. Ими же методом 3-мерного анализа поляризации впервые исследована магнитоэлектрика вблизи T_c на образцах PdFe(4% ат), и это была сенсация. Крупнейший советский специалист по магнетизму академик Я.Ш. Шур не пропускал нашу статью об исследовании магнитоэлектрики вблизи T_c в "Письма в ЖЭТФ" до тех пор, пока мы (Г.П. Гордеев, Л.А. Аксельрод и А.И. Огороков) не

съездили в Свердловск и не доказали на семинарах высокую чувствительность методов поляризованных нейтронов.



Установка 3-мерного анализа поляризации

Естественно, мы не прошли мимо проблемы ВТСП, где, помимо исследования кислородного состояния в порах керамических образцов и проникновения в них магнитного поля, был поднят большой пласт исследований распределения магнитного потока и, соответственно, критических токов внутри сверхпроводников методом прецессии \mathbf{P} в поле. Действительно, если внутри образца имеется магнитное поле \mathbf{B} , то вектор \mathbf{P} будет испытывать в нем ларморовскую прецессию $d\mathbf{P}(t)/dt = \gamma[\mathbf{P}(t), \mathbf{B}]$, и по повороту \mathbf{P} можно судить о величине и направлении поля \mathbf{B} в образце. Этот метод был использован (L.A. Akselrod, G.P. Gordeev, V.N. Zabenkin *et al.* *Physica C* **221**, 1994, 219–221) для визуализации распределения проникающего и захваченного магнитного потока в сверхпроводнике.

На рис. 4 показано такое распределение, из вида которого по уравнениям Максвелла вычислялась плотность тока (рис. 5) и определялось значение критического тока J_{C1} как для тока, поперечного полю $J_{\perp} = 1/2\pi \partial V/\partial y$, так и для продольного тока $J_{\parallel} = V/2\pi \partial\alpha/\partial y$, где α – угол поворота захваченного потока. Экспериментальная возможность измерять J_{\parallel} была реализована вращением внешнего поля на угол α перед его выключением. Впервые обнаруженный продольный ток имеет принципиальное значение. В теоретических работах (A.M. Campbell and J.E. Evetts. *Critical currents in Superconductors*. London. 1972 и J.R. Clem, A. Perer-Gonzales. *Phys. Rev. B* **33**, 1986, 1601) на основе деформации вихревой среды было показано, что продольный (вдоль направления магнитного поля) критический ток $J_{C\parallel}$ не ограничен (а именно, $J_{C\parallel} = J_{\text{pair}}$, где J_{pair} – ток разрушения Куперовских пар), а продольное электрическое поле E_{\parallel} всегда равно нулю.

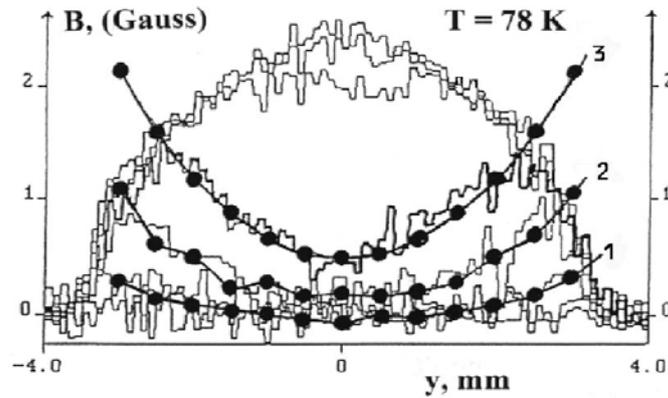


Рис. 4. Визуализация магнитного потока \mathbf{B} в Y-Ba-Cu-O керамике при включенном (кривые 1, 2, 3 для $H = 2,2, 3,1$ и 7 Э соответственно) и выключенном (захваченный поток) внешнем магнитном поле для ряда значений H

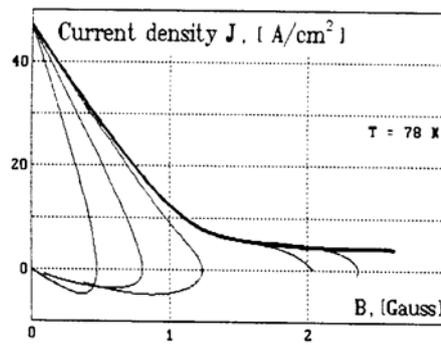


Рис. 5. Зависимость плотности тока от внутреннего поля при $T = 60$ К.
Жирная линия соответствует распределению $B(y)$ при $H > H_{c2}$

Но эксперимент показал, что $J_{C\parallel}$ сравним с $J_{C\perp}$, где $J_{C\perp}$ – поперечный критический ток, а $E_{\parallel} \neq 0$ при проникновении магнитного поля в сверхпроводник. Для объяснения была использована модель разрезания вихревых линий (модель FLC-flux-line cutting). Ее сущность в том, что вихри, появляющиеся на поверхности и непараллельные существующим вихрям в среде, проникают в образец, пересекая и объединяясь с соседними вихрями. В результате в модели FLC имеют ограничения все параметры, включая $J_{C\parallel}$ и $J_{C\perp}$, E_{\parallel} и E_{\perp} . Эта модель была непосредственно подтверждена в ПИЯФ (G.P. Gordeev, L.A. Akselrod, S.L. Ginzburg, V.N. Zabenkin, I.M. Lazebnik. *Physica B* **234**0236, 1997, 832).

Трехспиновые (киральные) динамические корреляции

Другим важным этапом исследований было теоретическое и экспериментальное обнаружение 3-спиновых (киральных или винтовых) динамических корреляций $C^{(3)} = \langle S_1^x(t_1)S_2^y(t_2)S_3^z(t_3) \rangle$. Относительное сечение рассеяния на них пренебрежимо мало (порядка 10^{-5}), но А.В. Лазута, С.В. Малеев и Б.П. Топерверг нашли, что сечение может возрасти в критической парамагнитной области в нулевом магнитном поле вблизи T_C и рассеяние обладает лево-правой асимметрией, связанной с направлением $\mathbf{n} = [\mathbf{k}', \mathbf{k}_0] / |\mathbf{k}', \mathbf{k}_0|$ при $\mathbf{P} \parallel \mathbf{n}$. Такой эксперимент был проведен в Гатчине А.И. Окорочковым, А.Г. Гукасовым и др., и впервые киральное рассеяние было измерено (Препринт № 366, ЛИЯФ, 1977 и А.И. Okorokov, A.G. Gukasov, I.M. Onchik and V.V. Runov. Phys. Lett. A **65**, 1978, 60). Эффект асимметрии был найден на уровне $1,5 \cdot 10^{-4}$ с температурным поведением, соответствующим теории. Продолжение этого эксперимента в намагниченном образце привело к обнаружению лево-правой асимметрии (ЛПА) рассеяния на спиновых волнах (рис. 6).

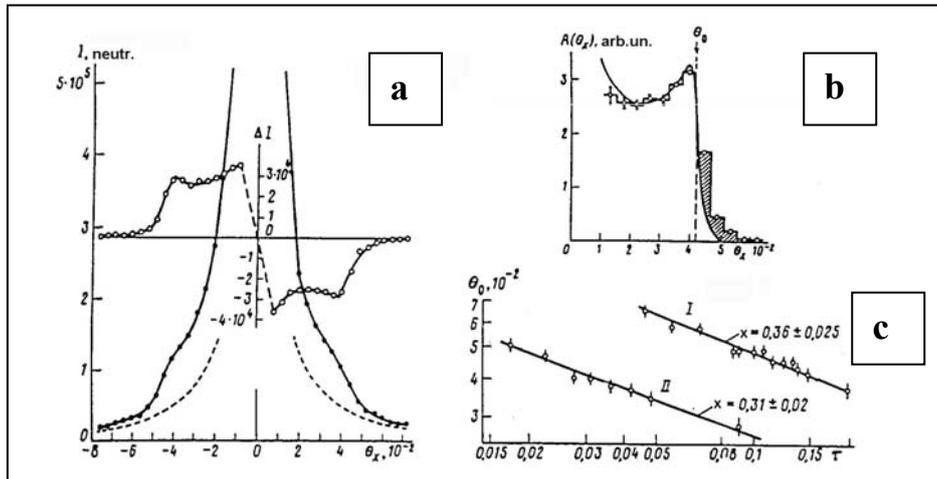


Рис. 6. Рассеяние поляризованных нейтронов на спиновых волнах в аморфном сплаве $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cr}_{10}\text{P}_{18}$: а) интенсивность прямого пучка, интенсивность полного рассеяния ($I_+ + I_-$) и спин-зависимое рассеяние $\Delta I = (I_+ - I_-)$; б) асимметричная часть кирального рассеяния $A(\theta_x) = 1/2[\Delta I(\theta_x) - \Delta I(-\theta_x)]$, сплошная линия – расчет с учетом углового разрешения установки, θ_0 – угол отсечки, заштрихованная область – эффект спин-волнового затухания; в) температурная зависимость угла отсечки θ_0 для образцов $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cr}_{10}\text{P}_{18}$ (I) и $\text{Fe}_{48}\text{Ni}_{34}\text{P}_{18}$ (II)

Действительно, в намагниченном образце работает псевдовектор $\mathbf{M}_{||} = (\mathbf{em})\mathbf{e}$ и в корреляторе $C^{(3)}$ магнитным полем фиксируется z компонента $S_3^z(t_3)$. При определенных условиях эксперимента (наклонное магнитное поле), связанных с четностью антисимметричной части сечения неупругого рассеяния нейтронов,

возможно наблюдение спин-волновых возбуждений, описываемых коррелятором $\langle S^x_1(t_1)S^y_2(t_2) \rangle$. Спин-волновая часть сечения имеет лево-правую асимметрию (ЛПА) и легко выделяется в эксперименте.

Развитую методику «наклонной геометрии» в намагниченном образце мы эффективно используем и в настоящее время. Методом ЛПА впервые была тщательно изучена спиновая динамика в магнитном поле (А.И. Огороков, А.Г. Гукасов, В.В. Рунов и др. ЖЭТФ **81**, 1981, 1462), и на примере железа получены принципиально новые результаты: получены нечетные по энергии спектры тройных спиновых корреляций; установлено, что критическая дипольная динамика в железе является «жесткой»; подтверждена гипотеза факторизации импульсной зависимости тройных динамических вершин при больших переданных импульсах. Были исследованы аморфные магнетики, инварные сплавы и множество других магнетиков.

Сложный рельеф большого массива данных рассеяния в координатах двухмерного XY-детектора (в наших экспериментах на установках реактора в ИЛЛ) обеспечивает высокую точность извлеченных параметров (например, для аморфного сплава $Fe_{50}Ni_{22}Cr_{10}P_{18}$ жесткость $D = 52,74 \pm 0,05$ мЭВ·Å², дипольная константа $\omega_0 \langle S_z \rangle = (50 \pm 3)10^{-6}$ эВ, затухание $\Gamma_0(\kappa R_c) = 25,2 \pm 0,5$). Было изучено изменение спин-волновых параметров от режима отжига сплавов и при их растяжении.

Важный результат с использованием методики ЛПА был получен при исследовании динамики Fe-Ni инваров. Проблеме инваров уже более 100 лет, но инварный механизм до сих пор не понят. Что касается динамики инваров, то в инварах дискутируемое в литературе отличие в 1,5–2 раза магнитной жесткости D_{0n} из нейтронных методов от D_{0m} , полученного по измерению намагниченности, базировалось на нейтронных измерениях при относительно больших q и $\omega \geq 1$ мЭВ, и были гипотезы, что это отличие пропадет при малых ω . С.В. Григорьевым и А.И. Огороковым в экспериментах на $Fe_{65}Ni_{35}$ было подтверждено, что такое отличие имеет место и для области малых q и $\omega = 10 \div 100$ мЭВ, но в диапазоне не очень низких температур (300–500 К). При измерениях в температурной области 50–500 К при внешнем магнитном поле 70–250 мТ оказалось, что во всей температурной области $0,9 > \tau = (1 - T/T_c) > 0,1$ поведение $D_{0n}(\tau)$ надежно описывается степенным законом $D(\tau) = D_0 \tau^x$ с $x = 0,48 \pm 0,01$ (рис. 7) и затухание было найдено равным $\Gamma_q = \Gamma_0 q^2$ с $\Gamma_0 = 12$ мЭВ·Å⁻² для всей температурной области $0,9 > \tau > 0,1$. Иными словами, эксперимент показал, что при низкой температуре закон $T^{5/2}$, следующий из уравнения Блоха и обычно используемый в расчетах D_0 , для инваров вообще не выполняется. Найденное температурное поведение $D(\tau) = D_0 \tau^x$ в широкой ферромагнитной области говорит о том, что вся эта область критическая. Логично предположить, что на самом деле инварная система находится в критической области по параметру G – давление. Дело в том, что эксперименты по давлению показывают резкое уменьшение T_c с повышением внешнего давления вплоть до $T_c \approx 0$ при критическом давлении $G_c = 6$ ГПа. С понижением температуры баланс спин-орбитального взаимодействия с другими видами взаимодействий может создать упругие напряжения, эквивалентные

приложению внешнего давления. В этом случае при данной температуре $T_x < T_c$ система находится в критической области по двум параметрам: T и G , т. е. вблизи T_{CGx} , наводимой давлением ($T_{CGx} < T_c$).

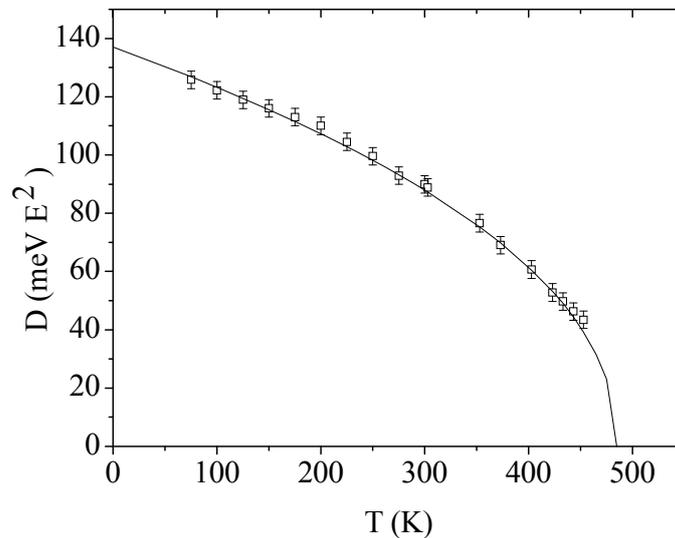


Рис. 7. Температурная зависимость магнитной жесткости D $Fe_{65}Ni_{35}$ при $T_c = 485$ К, удовлетворяющая условию $D(T) = D_0 T^x$ при $x = 0,48 \pm 0,01$ (сплошная кривая) и $D_0 = 137$ мэВ·Å²

Техника поляризованных нейтронов

Параллельно с физическими исследованиями велось совершенствование экспериментальной техники и методики малоуглового рассеяния. Еще в начале 60-х годов Г.М. Драбкиным был предложен метод пространственного спинового резонанса. Нейтроны пролетают в постоянном ведущем магнитном поле через зигзагообразную фольгу с током, создающим магнитное поле, перпендикулярное ведущему. В результате пролета через такую "гармошку" нейтроны испытывают знакопеременное воздействие магнитного поля с частотой, зависящей от их скорости. Для нейтронов с некоторой скоростью v эта частота сравнивается с ларморовской частотой прецессии в ведущем поле, и такие нейтроны испытывают переворот поляризации в узком диапазоне Δv . Последующим отражением от намагниченного зеркала получается монохроматический пучок. Такой магнитный монохроматор у нас доведен до совершенства и сейчас используется в других нейтронных центрах.

Основой поляризующей техники являются магнитные покрытия – поляризующие зеркала. После многих вариантов были изобретены стеклянные

зеркала с FeCo покрытием на TiGd подслое. На основе таких зеркал были впервые в СССР сделаны высокоэффективные поляризующие нейтроноводы (Г.М. Драбкин, А.Ф. Щебетов, А.И. Окороков, авт. свид.): один – для лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, а другой – для наших исследований на пучке 6 реактора ВВР-М в схеме корреляционного спектрометра (В.П. Плахтий, О.П. Смирнов и др.). В настоящее время Отделом нейтронной оптики, руководимым А.Ф. Щебетовым, а с 2008 г. А.П. Булкиным, созданы поляризующие многослойные суперзеркала и нейтроноводы на их основе.

Был создан 3-мерный анализатор поляризации рассеянных нейтронов (В.И. Рунов, А.И. Окороков), который в малоугловом рассеянии является пока единственным в мире (для брэгговского же рассеяния несколько позже 3-d-анализатор был создан в ИЛЛ). Модификация 3-d-анализатора для прошедшего пучка эффективно используется Г.П. Гордеевым, Л.А. Аксельродом и др. для исследования магнитной текстуры (3-d-анализатор для прошедшего пучка практически одновременно и независимо был создан Реквельдом в Делфте, Нидерланды).

Было опробовано много вариантов флиппера нейтронной поляризации. Самым эффективным оказался адиабатический (во вращающейся с частотой ω системе координат) резонансный флиппер, первоначально созданный в ПИЯФ (В.М. Лобашов, А.П. Серебров и др.) для ультрахолодных нейтронов и взятый нами на вооружение для тепловых нейтронов. Такими флипперами мы снабжаем сейчас многие установки нашего и зарубежных институтов.

Структурные исследования

Структурные исследования в секторе ИКС и затем в Отделе ИКС развивались и проводятся в основном лабораториями В.П. Плахтия и В.А. Трунова. Уже в 1963 г. были получены первые нейтронографические результаты (В.П. Плахтий и Е.И. Мальцев) по структурным исследованиям сегнетомагнетиков со структурой перовскита. Были исследованы образцы $\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, $\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ и получены сведения о связи обменного взаимодействия со смещениями атомов при сегнетоэлектрическом переходе.

В дальнейшем весьма плодотворными оказались результаты нейтронографических исследований кристаллической и магнитной структуры в системе граната $\{\text{M}_1\}[\text{M}_2](\text{M}_3)\text{O}_{12}$ с ионами различных металлов в трех кристаллографических позициях (В.П. Плахтий, И.В. Голосовский, О.П. Смирнов). Большое разнообразие магнитных структур, реализующихся и наблюдавшихся в этой системе, явилось одной из экспериментальных основ для метода теоретико-группового анализа спинового упорядочения в кристаллах, развитого Ю.А. Изюмовым и В.Е. Найшем.

Были выполнены исследования магнитного упорядочения в борацитах $\text{Co}_3\text{V}_7\text{O}_{13}$ и $\text{Fe}_3\text{V}_7\text{O}_{13}$, представляющих собой пример кристаллов со связью магнитной и сегнетоэлектрической подсистем (В.П. Плахтий и А.В. Ковалев).

Нужно отметить, что в начале эти работы проводились на дифрактометре, взятом в аренду у Института кристаллографии, а впоследствии авторы имели во временном пользовании дифрактометр Института полупроводников. Дело в том, что в отличие от техники малоуглового рассеяния, которая создавалась силами институтской мастерской, создание дорогостоящих дифрактометров и спектрометров для исследования атомной и магнитной структуры и динамики или их приобретение ограничивалось отсутствием достаточных финансовых средств.

Оптимальным вариантом являлось создание на реакторе ВВР-М экспериментальных установок для относительно светосильной методики, а наиболее сложные эксперименты, требующие высокого разрешения и статистической точности, проводить в ИЛЛ и других западных центрах в совместных исследованиях с использованием идеологии и методических достижений ПИЯФ. В 1977–1978 гг. под руководством В.П. Плахтия такая установка, корреляционный спектрометр поляризованных нейтронов для анализа поляризации в дифракции на кристаллах, была создана. Она оказалась конкурентоспособной с аналогичным прибором ИЛЛ D5, несмотря на то, что поток нейтронов в прямом пучке был примерно в 10 раз меньше. Это стало возможным благодаря тому, что вместо традиционной схемы двух монокристаллов, поляризующего и анализирующего, с очень малой отражательной способностью, в качестве поляризатора использовался упомянутый выше поляризующий нейтронпровод на 6-м канале реактора с пропусканием около 90%, а функции анализатора и монохроматора выполнялись одним монокристаллом Гейслера, установленным после исследуемого образца.



Г.М. Драбкин: «Ну, я вам покажу!»

Слева направо: О.П. Смирнов, В.А. Кудряшов, И.В. Голосовский, В.П. Плахтий

В первых экспериментах для ортоферрита иттрия на этой установке было обнаружено (В.П. Плахтий, Ю.П. Черненко, М.Н. Бедризова. *Solid State Commun.* 47, 1982, 309) очень малое отклонение от коллинеарности атомных магнитных

моментов, не приводящее к появлению спонтанного момента (слабый антиферромагнетизм). Отношение слабой антиферромагнитной компоненты спинов Fe^{3+} в ортоферрите иттрия к основной было экспериментально определено на уровне 2×10^{-2} .

Только в 1982 г. по программе и финансированию подготовки оборудования для будущего реактора ПИК были разработаны и изготовлены в ОРФО, руководимом В.А. Труновым, многосчетчиковый дифрактометр и времяпролетный Фурье-дифрактометр (В.А. Трунов, И.В. Голосовский, В.А. Кудряшев и др.)

С таким оснащением была проведена серия работ, посвященных изучению роли магнетизма в возникновении ВТСП в первом сверхпроводнике $\text{La}_{1.83}\text{Sr}_{0.17}\text{CuO}_4$, а также исследованию атомной магнитной структуры в соединениях $R_2\text{CuO}_4$ ($R = \text{La}, \text{Sr}, \text{Nd}, \text{Ce}, \text{Eu}$), являвшихся основой для создания высокотемпературных сверхпроводников с электронной проводимостью (кандидатская диссертация И.А. Зобкало).

Работы по исследованию магнитной структуры соединений $R_2\text{CuO}_4$ получили последующее развитие, и эксперименты проводились на высокопоточном реакторе ИЛЛ. В результате этих экспериментов были обнаружены индуцированные внешним полем квантовые фазовые переходы в новые состояния, а также получена информация о критических явлениях при квантовых фазовых переходах (кандидатская диссертация С.В. Гаврилова).

К сожалению, А.Г. Гукасов, который был в течение нескольких лет ответственным за корреляционный спектрометр поляризованных нейтронов, в 1992 г. перешел на постоянную работу во Французский Комиссариат по атомной энергии (КАЭ, Сакле, Франция), где сейчас широко использует опыт, полученный им в ПИЯФ. Однако связь с ним не потеряна, что позволяет нашим сотрудникам проводить в ЛЛБ эксперименты по дифракции поляризованных нейтронов и получать информацию о пространственном распределении плотности намагниченности на атомном уровне. К примеру, изучено распределение плотности намагниченности в антиферромагнетике $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, структурные особенности которого позволили наблюдать с большой точностью плотность намагниченности на ионах кислорода, через которые передается информация о направлении магнитного момента от одного иона железа к другому. Подобные эксперименты проводились сотрудниками ПИЯФ и на других перспективных материалах.

В сотрудничестве с ИЛЛ было исследовано магнитное упорядочение и магнитные флуктуации в молекулярном твердом кислороде – единственном веществе, в котором носителями магнитного момента являются p -электроны (диссертация Ф. Данстеттера, КАЭ, Франция, выполненная под руководством В.П. Плахтия). Исследованы связанные сегнетоэлектрические и магнитные переходы в EuMn_2O_5 . В этом случае поляризационный анализ является единственным методом, позволяющим разделить эффекты, связанные с изменениями кристаллической и магнитной структур. Исследованы спиновые флуктуации в медь-кислородных цепочках ВТСП соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$, которые представляют собой единственный пример одномерной сильно коррелированной фермионной системы.

При нейтрон-дифракционных исследованиях соединения $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0,23$) (Ю.П. Черненко и др. *Solid State Communications* **128**, 2003, 41–45) было обнаружено, что с понижением температуры от 500 до 4,2 К имеет место слабое искажение структуры с понижением симметрии от Pbnm к моноклинной. Эти искажения проявляются для длин связей Mn-O и углов Mn-O-Mn. С этими структурными изменениями коррелируют особенности, наблюдаемые в ЭПР исследованиях. Из них следует, что с понижением температуры при $\sim T_c + 20$ К **возникает вторая магнитная фаза**, аномальное критическое поведение которой отличается от типичного для классического 3D-ферромагнетика и наблюдаемого при $T > T_c + 20$ К.

Помимо изучения структурных свойств большого числа магнетиков, в лаборатории В.П. Плахтия в 80–90-х годах были успешно выполнены исследования магнитной динамики целого ряда антиферромагнетиков с помощью неупругого рассеяния нейтронов. В частности, важный результат был получен при исследовании спектра спиновых волн в антиферромагнитных гранатах с динамически взаимодействующими спиновыми подсистемами. В системе $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ с двумя антиферромагнитными подрешетками, которые не связаны друг с другом в приближении молекулярного поля, впервые экспериментально была найдена энергетическая квантовая щель в спектре спиновых волн при $q = 0$, связанная с нулевыми флуктуациями спинов (В.П. Плахтий и др. *Europhysics letters* **7(1)**, 1988, 83). На рис. 8 показан измеренный в эксперименте при $T = 1,5$ К и рассчитанный спектр спиновых волн для граната $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$.

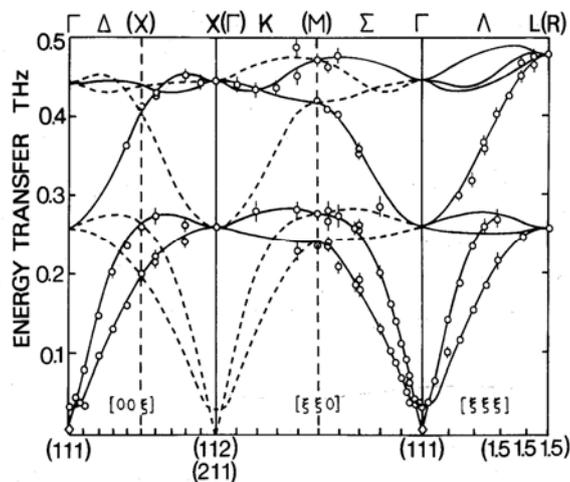


Рис. 8. Спектр спиновых волн для граната $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

Проблема киральности

С 1982 г. на установке ПИЯФ были начаты исследования по проблеме спиновой киральности, которые определили одно из основных направлений лаборатории В.П. Плахтия на многие годы. Киральность (направление вращения винта) является фундаментальной характеристикой веществ с винтовой структурой, часто встречающихся как в живой, так и в неживой природе. Эти вещества, например белки и ДНК, играют очень важную роль, и поэтому понимание зависимости их свойств от киральности представляется одной из первостепенных задач. В частности, известно, что все природные белки имеют одинаковую киральность и являются правовинтовыми, в то время как искусственные их аналоги (полипептиды) обладают разной киральностью. Винтовое, геликоидальное, упорядочение магнитных моментов (спинов) широко распространено в магнетиках, и проблемы киральности, или, другими словами, винтовых спиновых структур и винтовых возбуждений, постоянно привлекают большое внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. Критическое поведение вблизи фазовых переходов упорядочения II рода определяется симметрией, размерностью пространства и параметра порядка независимо от индивидуальных особенностей объекта. Оно характеризуется степенными зависимостями от приведенной температуры, $\tau = (T - T_C)/T_C$, где T_C – температура перехода. Критическое поведение характеризуется набором степеней τ для теплоемкости α , параметра порядка β , восприимчивости γ и корреляционной длины флуктуаций ν . Наборы этих степеней (критических индексов) характеризуют классы универсальности фазовых переходов. Кавамура (J. Phys. Soc. Japan. **54**, 1985, 3220) было отмечено, что в киральных магнитных системах появляется дополнительная степень свободы и переходы магнитного упорядочения в них относятся к новым **киральным** классам универсальности. В киральных магнетиках, кроме перечисленных выше критических индексов, фазовые переходы характеризуются дополнительными индексами: β_C – для киральности, γ_C – для киральной восприимчивости и ν_C – для длины корреляции киральных флуктуаций. Естественно, что величины киральных индексов более чувствительны к киральной критичности, а их измерение является очень важным, так как гипотеза Кавамуры до сих пор дискутируется.

Как правило, магнетики с геликоидальной спиновой структурой разбиваются на домены с противоположной магнитной киральностью, и заселенность доменов одинакова. Для изучения киральности необходимо иметь разную доменную заселенность. В первых же экспериментах на гольмии, проведенных в ПИЯФ, было замечено, что упругое скручивание вокруг оси магнитного геликоида приводит к заметному различию ($\sim 10^{-2}$) в количестве доменов с разной магнитной киральностью. Этот эффект был объяснен С.В. Малеевым, который показал связь киральности с винтовой деформацией кристалла. С.В. Малеев дал теоретическую основу для измерения киральных критических индексов. В результате экспериментов, проведенных в ИЛЛ на треугольном антиферромагнетике CsMnBr_3 (В.П. Плахтий, Е.В. Москвин и др.), была доказана его принадлежность к новому киральному классу универсальности, предсказанному Кавамура. При

исследовании киральной критичности в гольмии со спиральной магнитной структурой было обнаружено, что для гольмия $\beta_C = 0,90(3)$ в два раза больше, чем $\beta_C = 0,44(2)$ для CsMnBr_3 , хотя, согласно Кавамуре, эти два магнетика должны относиться к одному киральному классу. Контрольные эксперименты показали, что аномально большая величина β_C для гольмия не связана с механизмом обменного взаимодействия. Окончательно вопрос не решен, но есть все основания полагать, что переходы в геликоидальную магнитную структуру в гольмии и в треугольную структуру в CsMnBr_3 относятся к разным классам киральной универсальности. Интересно отметить, что в упомянутом выше эксперименте по малоугловому рассеянию на геликоидальной структуре MnSi , обязанной взаимодействию Дзялошинского–Мория, киральный критический индекс β_C получен равным $\beta_C = 0,47(4)$, т. е. равным β_C для CsMnBr_3 . Эксперименты по проблеме киральности продолжаются.

Область с применением поляризационного анализа расширена на неупругое рассеяние нейтронов. Совместно с сотрудниками Исследовательского центра Юлих (Германия) и Гренобльского центра ядерных исследований (Франция) впервые наблюдались продольные спиновые возбуждения. В будущем планируется расширить круг исследований, включая киральные флуктуации при квантовых фазовых переходах.

Как видно из полученных результатов, киральность, характеризующая направление поворота спинов в киральных структурах, сильно проявляется в критической области, где система обладает высокой чувствительностью. Можно предположить, что киральность не случайно играет очень важную роль в живой материи, которая представляет собой неравновесное состояние.

При исследовании **статической** киральности в монокристалле MnSi (С. Григорьев, А.И. Окорочков и др.) впервые наблюдались спиральные магнитные флуктуации в парамагнитной области как предвестники спиральной структуры ниже $T_C = 28,7$ К, которая возникает в результате взаимодействия Дзялошинского–Мория. В геликоидальной области $T < T_C$ наблюдались брэгговские пики рассеяния на спиралах и подтверждено, что вращение спиралей левое. Обнаружено нетривиальное поведение спиральной структуры в магнитном поле \mathbf{V} (гистерезис по \mathbf{V} , ”стягивание” спиралей к направлению \mathbf{V} , изменение их поляризации, изменение периода спирали с температурой от $d = 162$ Å при $T = 28$ К до $d = 182$ Å при $T = 10$ К). Киральный критический индекс β_C в зависимости $M = M_0 t^\beta$ найден равным $\beta_C = 0,47 \pm 0,04$. Интегральная интенсивность брэгговского рефлекса показывает резкий минимум при $H \approx 160$ мТ, отражающий нестабильность спиральной структуры. Когда поле имеет компоненту, перпендикулярную волновому вектору спирали \mathbf{k} , то вектор \mathbf{k} поворачивается к направлению поля в области $H < H_{in} = 180$ мТ. Дополнительно перпендикулярным магнитным полем индуцируется вторая гармоника спиральной структуры при $H < H_{in}$. Эти три явления находятся в хорошем согласии с теоретически найденной С.В. Малеевым щелью в спектре спиновых волн, которая обеспечивает стабильность спин-волнового спектра по отношению к перпендикулярному магнитному полю. Дальнейшее возрастание поля приводит к магнитному фазовому переходу из

конического в ферромагнитное спиновое состояние вблизи $H_{c2} \approx 600$ мТ. Критическое поле H_{c2} связано со спин-волновой жесткостью D в виде $g_{\mu_B} H_{c2} = Dk^2$. Наши данные находятся в согласии с соответствующей теорией С.В. Малеева (PRB 73, 2006, 1744402) для кубических магнетиков с взаимодействием Дзялошинского–Мория, которое связывает главные параметры спин-волнового спектра (такие как спин-волновая жесткость D и щель Δ) с поведением спиновой структуры $MnSi$, наблюдаемым в приложенном магнитном поле.

В соответствии с теоретическими выкладками можно получить часть энергии основного состояния, отвечающего за взаимодействие с магнитным полем E_h , в зависимости от углов ϑ и φ , которые связывают векторы \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} с системой координат кристаллографической ячейки при разных значениях Δ . В этих координатах двумерная поверхность энергии основного состояния имеет минимумы при $\vartheta = \arccos(1/\sqrt{3})$ и $\varphi = \pi/4$, соответствующие оси [111], параллельной направлению поля. По мере увеличения поля до $h = \Delta$ на поверхности появляется новая долина. Эта долина расположена в направлении, перпендикулярном оси поля, и означает появление нового минимума. Однако эта долина еще слишком мелкая по сравнению с минимумом, обеспечиваемым параллельной составляющей поля вдоль оси [111]. Долина становится глубже, чем минимум вдоль оси [111] при $\Delta < h < \Delta\sqrt{2}$. В этом диапазоне полей можно, следовательно, ожидать, что вектор \mathbf{k} повернется от оси [111] (направление поля) к направлению, перпендикулярному этой оси. Это означает возможность экспериментального наблюдения явления, связанного с киральным квантовым фазовым переходом. Это явление опрокидывания вектора \mathbf{k} наблюдалось экспериментально (рис. 9). Наблюдаемый эффект связан с наличием щели в спектре спиновых волн $\Delta^2 \sim H_R^2/2 \cong (0,01)^2 \text{ мэВ}^2$. Слева показаны интенсивности пиков спиралей, направленных по оси [111] (красная) и по перпендикулярной ей оси [1-10] (синяя). Видно, что в интервале полей 120–170 мТ интенсивности переходят от одной оси к другой, демонстрируя теоретически предсказанную нестабильность, связанную с киральным фазовым переходом. Справа этот же результат показан непосредственно на карте детектора.

Другой интересный эффект наблюдался в киральном соединении $Fe_{1-x}Co_xSi$. Здесь при изменении концентрации x вблизи $x = 0,18$ киральность меняет знак на противоположный (рис. 10).

Как показали структурные исследования, данное соединение имеет структурную спираль, которая при этой концентрации x тоже меняет знак. Так неожиданно была обнаружена связь знака вектора Дзялошинского с атомной структурой, что теорией до сих пор не предполагалось.

Наноструктурные функциональные материалы

В последние годы наноматериалы буквально произвели революцию в материаловедении. Одним из важнейших научных направлений является получение наноструктур с заданными характеристиками и создание функциональных

наноматериалов на их основе для применения в микроэлектронике, катализе, химии, атомной энергетике и во многих других областях техники.

По своей функциональной применимости наноматериалы условно нужно разделить на 2 категории:

1. Упорядоченные (квазикристаллические) структуры из элементов с размерами 10–100 нм для электроники и вычислительной техники с целью создания высокой плотности записи информации.
2. Пористые материалы с максимально развитой поверхностью для целей сорбции, катализа и пр.

В ОИКС велись и ведутся исследования по всем категориям наноматериалов.

Изучение свойств материалов в ”ограниченной геометрии”

Одной из важнейших задач современной физики твердого тела является изучение наноструктурированных материалов. Их необычные свойства важны для использования в практических целях, в то же время физические исследования хорошо известных, классических материалов, ограниченных малыми размерами, являются важной задачей фундаментальной науки. В общем плане все наноструктурированные материалы можно рассматривать как обычные соединения, которые синтезированы в искусственно созданных границах, в условиях так называемой ”ограниченной геометрии”. Систематическому исследованию морфологии, атомной и магнитной структуры, атомных колебаний, фазовых переходов и связанных с ними структурных искажений в антиферромагнитных оксидах посвящен цикл работ И.В. Голосовского (лаб. В.П. Плахтия).

В частности, исследования классического антиферромагнетика MnO , наноструктурированного в мезопористых матрицах канального типа с регулярной системой параллельных каналов МСМ-41 (рис. 11) показали, что с уменьшением диаметра канала температура магнитного упорядочения и критический индекс уменьшаются, что объясняется ростом анизотропии магнитной системы. Обнаружено, что MnO кристаллизуется в форме узких, 50–90 Å, и тонких, 4–9 Å, лент с длиной 270–350 Å. Размерный эффект приводит к тому, что разрывный переход первого рода в обычном образце в условиях ”ограниченной геометрии” становится переходом второго рода; а из-за разупорядочения спинов на поверхности наночастицы усредненный магнитный момент оказывается меньше. Обнаружен неизвестный ранее ”возвратный” низкотемпературный переход от ромбоэдрической фазы к кубической, который сопровождается резким увеличением параметра решетки и появлением внутренних напряжений. Экспериментально доказано, что в наночастицах MnO внутри матрицы МСМ-48 с гироидальной системой каналов дальний позиционный порядок отсутствует. Несмотря на отсутствие регулярной атомной решетки, сохраняется фазовый структурный переход, обусловленный магнестрикцией.

Обнаружены новые эффекты, обусловленные взаимодействием матрицы из пористого стекла и внедренного материала (Se, Pb), в частности необычное ”замерзание” атомных колебаний вдоль гексагональной оси в Se, отсутствие

эффекта Грюнайзена в Pb, наноструктурированных внутри пористого стекла и другое.

В нейтрон-дифракционных исследованиях новых гетерогенных наносистем "ядро-оболочка", где антиферромагнетик является ядром, а ферромагнетик $\gamma\text{-Mn}_2\text{O}_3$ оболочкой, обнаружен индуцированный ферромагнитный порядок в оболочке, который существует вплоть до комнатной температуры, много выше температур собственного магнитного упорядочения в ядре (130 К) и оболочке (43 К). Также наблюдался "симметричный эффект" – индуцированный антиферромагнитный порядок в ядре. Это первое экспериментальное наблюдение дифракционным методом "**обменного подмагничивания**" магнитных систем ядра и оболочки через спиновый "беспорядок" в интерфейсе. Полученные результаты являются важными для создания научных основ спинтроники.

Двумерные пространственно упорядоченные наносистемы

В исследованиях С.В. Григорьева с аспирантами (лаб. В.В. Рунова) рассмотрены некоторые особенности технологии получения матриц анодированного оксида алюминия. Впервые методом малоуглового рассеяния нейтронов исследованы структурные характеристики двумерных пространственно-упорядоченных систем на основе пленок пористого оксида Al. Анализ данных нейтронного рассеяния продемонстрировал высокую, почти идеальную, степень упорядочения пор матрицы оксида алюминия (рис. 12) на площади пленки порядка $0,5 \text{ см}^2$, соответствующей гексагональной упаковке пор (поры в виде трубчатых каналов радиуса R). Такие пленки с совершенной наноструктурой будут использоваться для синтеза матриц из нанонитей или нанотрубок с контролируемым диаметром и высокой геометрической анизотропией и матриц для записи информации в случае заполнения пор магнитным материалом (рис. 13). Каналы перпендикулярны плоскости пленки и заполняются магнетиком для создания матрицы с высокой плотностью записи информации. На самом деле это – инвертированный фотонный кристалл, состоит из кобальтового наполнителя. Размер образца $1 \times 1 \text{ мм}$, толщина $\sim 10 \text{ мкм}$, количество слоев около 20.

Получена детальная картина процесса перемагничивания упорядоченного массива магнитных нанонитей, внедренных в диамагнитную матрицу-мембрану с упорядоченными каналами (Письма в ЖЭТФ **85**, 2007, 549–554).

Феррожидкости

К наноструктурной науке относятся и нейтронные исследования феррожидкости на основе Fe_3O_4 . По существу задача сводится к исследованию магнитных характеристик наноструктурных образований, при этом существует возможность использования калиброванных гранул Fe_3O_4 требуемого размера, начиная с $\sim 100 \text{ \AA}$. Исследование супермагнитных наночастиц важно не только для понимания фундаментальных свойств супермагнетизма, но и для применения магнитных жидкостей в практических целях, таких как создание накопителей

информации высокой плотности, использование в медицине для направленной транспортировки лекарственных средств, использование в подшипниках скольжения, в вакуумных уплотнениях подвижных деталей и во многих других технических приложениях. На рис. 14 изображена полученная экспериментально Г.П. Гордеевым и А.А. Воробьевым (лаб. В.В. Рунова) на нейтронном рефлектометре структура феррожидкости для концентраций 2, 5 и 7% (соответственно порядку рисунков) частиц Fe_3O_4 в тяжелой воде D_2O .

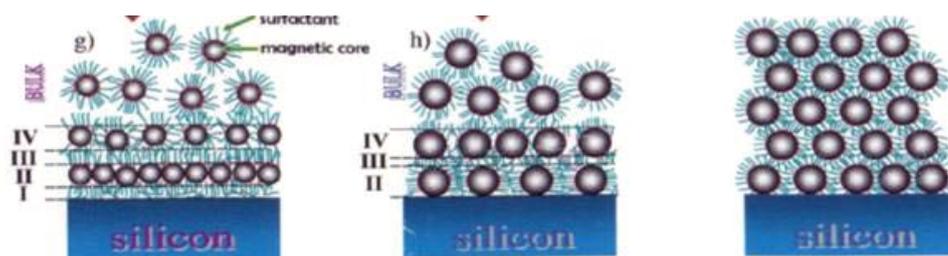


Рис. 14. Структура феррожидкости

Функциональные материалы

Материалы с термоупругими мартенситными превращениями, обеспечивающими обратимую пластическую деформацию – ”эффект памяти формы” (ЭПФ), привлекают внимание исследователей уже не одно десятилетие. Это связано с их практическим применением в космической технике, медицине, точном машиностроении. Сплавы с памятью формы относят к группе так называемых функциональных материалов, поскольку их свойствами можно эффективно управлять, меняя внешние параметры. В последнее десятилетие в группе функциональных материалов появилось новое направление – материалы с магнитоконтролируемым эффектом памяти формы (МЭПФ), ярчайшим представителем которых является Ni_2MnGa . Особенность сплава в том, что мартенситное превращение происходит в ферромагнитном состоянии, причем температура ферромагнитного перехода (T_C) и, особенно, мартенситного перехода (T_m) существенно меняется при отклонении химического состава от стехиометрического, включая диапазон комнатных температур, что крайне привлекательно с точки зрения практического применения. Более того, известно, что именно нестехиометрические сплавы обладают наиболее ярко выраженными функциональными свойствами. Сильная взаимосвязь структурной и магнитной подсистем определяет эффект МЭПФ, который достигает в сплавах Ni-Mn-Ga 6%, слияние магнитного и структурного переходов в один магнитоструктурный переход, обеспечивающий сильный магнитокалорический эффект.

Целью проведенных в лаборатории В.В. Рунова на установке малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов ”Вектор” (4 канал ВВР-М) экспериментов было изучение и сравнение эволюции мезоструктуры в стехиометрическом сплаве

(С) Ni_2MnGa и нестехиометрических сплавах (НС) с марганцевым ($\text{Ni}_{49.1}\text{Mn}_{29.4}\text{Ga}_{21.5}$) и никелевым ($\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$) обогащениями в широком температурном диапазоне $15 \text{ K} < T < 400 \text{ K}$.

Первое, что было показано в этих экспериментах, это возможность измерения структурного фазового перехода 1-го рода благодаря магнитному контрастированию, поскольку мартенситное превращение происходит в ферромагнитном состоянии. Сравнительная картинка для (НС) и (С) систем представлена на рис. 15.

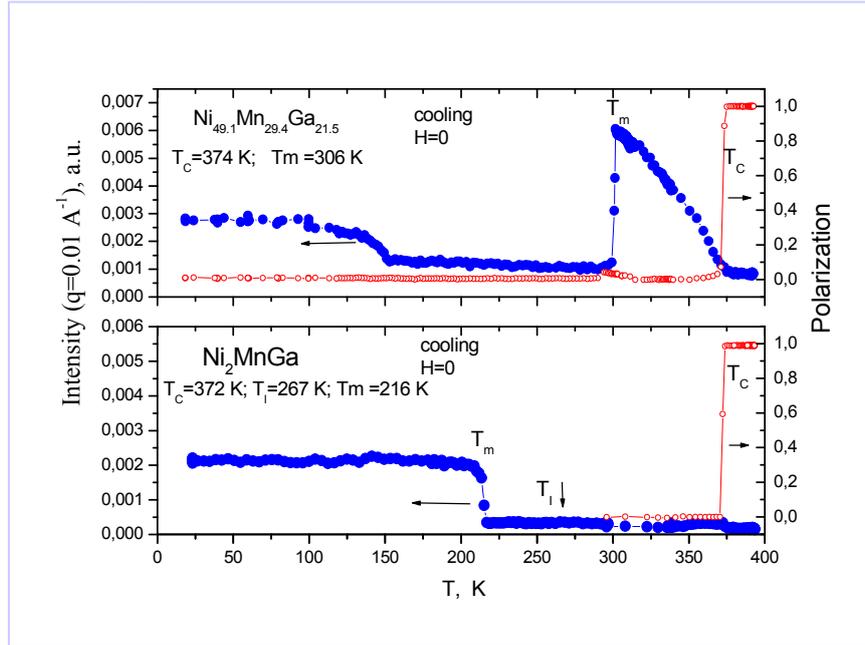


Рис. 15.

Характерные температуры: T_C – пара-ферро-переход; T_m – мартенситный переход; T_1 – предмартенситный переход, предполагаемый, но никем ранее экспериментально не подтвержденный ($q = 0,007 \text{ \AA}^{-1}$)

Видно существенное различие в эволюции мезоскопической структуры (С) и (НС). При этом известно, что они имеют и разное значение МЭПФ, как правило, значительный эффект ПФ наблюдается только в (НС) сплавах. В измеряемом сплаве $\text{Ni}_{49.1}\text{Mn}_{29.4}\text{Ga}_{21.5}$ при комнатной температуре он составляет 2,5%. Оба состава имеют практически одинаковое значение точки Кюри $T_C \cong 373 \text{ K}$, а температуры мартенситного перехода различаются на 90 градусов ($T_m = 306 \text{ K}$ для (НС) состава и 216 K для (С)). Значения T_m совпадают с ранее известными, но мезоструктурное поведение вблизи T_m совершенно разное. Основные различия в интенсивности малоуглового рассеяния в (НС) и (С) составах: 1) рост рассеяния с понижением температуры в аустенитной фазе (НС) состава ($T_m < T < T_C$) и резкий спад, т. е. практически полная гомогенизация сплава в мезоскопическом масштабе при $T \approx T_m$ после перехода в мартенситную фазу и, наоборот, скачок в рассеянии в

мартенситной фазе (С) состава; 2) рост малоуглового рассеяния в (НС) составе при $T < 150$ К; 3) пик в рассеянии в Ni_2MnGa при $T_1 \approx 267$ К (вставка на рис. 15.), классифицируемый как отражающий предмартенситный фазовый переход (явный вид его получен впервые). Выполненные эксперименты дают основание предполагать, что хорошая мезоскопическая гомогенизация при переходе в мартенситное состояние является необходимым условием хорошего эффекта магнитной памяти формы. В сплавах с обогащением по Ni ($x = 0,18-0,27$) реализуется совмещенный магнитоструктурный переход, однако не наблюдается возрастания гомогенности в мезоскопическом масштабе при мартенситном фазовом переходе, характерного для сплавов с Mn обогащением. В этих сплавах трудно, по-видимому, ожидать существенного эффекта магнитной памяти формы. Однако эти составы интересны по-своему: например, самим фактом существования совмещенного магнитоструктурного перехода. Наличие этого явления позволяет реализовать структурный переход, изменяя магнитное поле и обеспечивая этим большой магнитокалорический эффект.

В.В. Рунов, Ю.П. Черненко, М.К. Рунова и др. Письма в ЖЭТФ **74**, 2001, 668; Physica B **335**, 2003, 109; Physica B **350**, 2004, 87; ЖЭТФ **129**, 2006, 117; ФТТ, 2009 – принято в печать.

Материалы с развитой поверхностью

Материалы с развитой поверхностью широко используются в химии катализа, в экологии для очистки среды от вредных или радиоактивных элементов, в водородной энергетике и пр.

Одним из важных материалов является диоксид олова SnO_2 (касситерит), находящий технологическое применение в фотоэлектрических устройствах, фотодетекторах, прозрачных проводящих электродах, катализе, в литиевых ионных батареях и пр. Кроме того, касситерит используется в качестве сорбента с высокой селективностью к радионуклидам кобальта, стронция, трансурановых элементов. Для достижения необходимых характеристик требуется иметь сорбент с развитой удельной поверхностью и высокой пористостью. Весьма перспективным в этом отношении является золь-гель метод синтеза. Он позволяет получать материалы в виде сферических механически прочных гранул с воспроизводимыми свойствами. Эти характеристики формируются на стадии образования нанокристаллического состояния, что обуславливает необходимость детального исследования его свойств в процессе синтеза.

На установке малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов "Вектор-20" (реактор ВВР-М, лаб. В.В. Рунова) было проведено исследование топологии и наноструктуры ксерогелей диоксида олова SnO_2 с разной температурой термической обработки $373 \text{ K} \leq T_{\text{от}} \leq 1273 \text{ K}$. Найдено, что максимальная площадь поверхности получается при температуре отжига 673 К и равна $69 \text{ м}^2/\text{г}$. При этом корреляционный радиус неоднородности составляет $R_c = 70 \text{ \AA}$.

Фрактальные свойства аморфных ксерогелей изучались на гидратированном диоксиде циркония ZrO_2 , синтезированного осаждением из раствора нитрата

циркониила при различных значениях pH среды (3, 4, 5, 6, 7 и 9). Из экспериментальных сечений рассеяния получен вид коррелятора ядерной плотности амплитуды рассеяния, определены характерные радиусы рассеивающих неоднородностей и удельные поверхности, а также прослежена их эволюция в зависимости от pH среды. Обнаружено, что pH среды при осаждении гелей гидратированного диоксида циркония оказывает существенное влияние на фрактальные характеристики гелей, а также влияет на размеры кластеров и образующих их мономерных частиц. Установлено, что ключевым фактором, определяющим состав и структуру гелей, является отклонение pH осаждения гелей от $\text{pH} \approx 6$, соответствующего изоэлектрической точке гидратированного $\text{ZrO}_2(\text{pH}_{i.e.p.})$ (Г.П. Копица и др. Письма в ЖЭТФ **85**, 2007, 132–136).

Материалы с особыми свойствами

В свое время главным техническим достижением лаборатории В.А. Трунова (лаборатория исследования материалов) было создание времяпролетного дифрактометра **RTOF Mini-SFINKS** (В.А. Трунов, В.А. Кудряшев, Д.Ю. Чернышев) и гамма-дифрактометра **GD** (А.И. Курбаков, А.Е. Соколов, Э.Э. Рубинова). Эти приборы стали основными для исследования структурных особенностей и их связей с физическими свойствами различных соединений. В порошковом дифрактометре используется обратный времяпролетный метод (RTOF) с фурье-прерывателем, позволяющим получать разрешение $\Delta d/d = 0,25\%$. Детектор обратного рассеяния имеет апертуру 0,1 стерад. и состоит из 4-х тонких пластин сцинтилляционного стекла (с фотоумножителями диаметром 110 мм), расположенных на поверхности с временной фокусировкой. Оптимизированный тракт источник-коллиматор-нейтроноводы позволяет получить на образце поток $1,5 \cdot 10^7$ н/см²с для спектра $\lambda = 0,9-5$ Å.

На этом дифрактометре получено большое количество значимых результатов.

1. По проблеме ВТСП выполнено 18 экспериментов. Среди них одна из 5 первых в мире публикаций по расшифровке структуры 1-2-3 ВТСП соединения.

2. С использованием изотопного контрастирования установлена позиция атома ⁴⁴Ca в соединении $\text{Y}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ (Ca замещает Y). В этом соединении обнаружен структурный фазовый переход при $T = 150$ К.

3. В 1-2-3 ВТСП системах, допированных Fe, получены данные о распределении атомов Fe в кристаллической решетке, дополнительно проверенные в ИЛЛ и Виллигене (Швейцария).

4. Тщательно исследована структура керамик типа Re_2CuO_4 для $\text{Re} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}$ и, в частности, обнаружено нелинейное изменение постоянных решетки для Sm-керамики.

5. Обнаружен ряд явлений в гексаборидах редких земель ReB_6 ($\text{Re} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Y}$). Здесь установлено наличие вакансий в борной подрешетке, уменьшение характеристической эйнштейновской частоты с увеличением атомного номера редкоземельного элемента, эффекты промежуточной валентности и ряд других явлений.

6. Проведено уточнение структурного типа соединения NdF_3 , которое используется для приготовления суперионных материалов.

За цикл работ по созданию нейтронной техники и полученным физическим результатам доктору физ.-мат. наук В.А. Трунову и кандидату физ.-мат. наук В.А. Кудряшеву в 2000 г. была присуждена Государственная премия РФ.

Дефекты совершенных кристаллов

Изучение реального состояния совершенных монокристаллов, естественной и наведенной дефектности проводилось на гамма-дифрактометре **CD**. В качестве источника гамма-излучения (200 Cu) используется активированная тепловыми нейтронами золотая пластинка размером $0,1 \times 5 \times 18 \text{ мм}^3$. Высокая монохроматичность пучка $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$ при $\lambda = 0,03 \text{ \AA}$ и угловое разрешение в 4 угловых секунды обеспечивают прецизионные дифрактометрические измерения, например, при исследовании монокристаллов кварца с плотностью дислокаций от 0 до 200 дисл./см оказалось возможным определять их плотность с точностью до нескольких штук.

Механизмы стабилизации водорода в композитах

Методами рассеяния нейтронов изучены композиты ZnOCuH(D) , насыщенные водородом (дейтерием) до содержания $\sim 1\%$ (мас.). При охлаждении образцов (матрицы ZnO с кристаллами Cu размером $\sim 10 \text{ нм}$) от 300 до 4 К водород (дейтерий) конденсируется у поверхности и проникает внутрь кластеров, где атомная концентрация H относительно Cu достигает $\sim 30\%$ при 20 К. Одновременно водород заполняет нанопоры ZnO -матрицы. Установлено, что при 90–300 К примерно 1/3 водорода участвует в быстрой диффузии (константа $\sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$), а 2/3 – локализовано. При 20 К доля подвижного водорода падает до $\sim 10\%$. Данные указывают на низкие энергетические барьеры, удерживающие водород в областях дефектов (V.A. Trounov, V.T. Lebedev, Yu.S. Grushko, A.E. Sokolov *et al.* Engineering Crystallography Reports **52(3)**, 2007, 512–520).

Катодные материалы

При исследовании высокоэффективных катодных материалов Li_xMnO_2 для ионных батарей (А.И. Курбаков, В.А. Трунов) установлено, что:

1. Микронеоднородное строение является фактором, определяющим физические и функциональные свойства.
2. Общей чертой исследованных составов является заметная обращенность структуры, которая проявляется в присутствии ионов Mn на Li позициях, и наоборот, причем исключения не составляет и стехиометрический состав.
3. Первопринципные расчеты гипотетической $(\text{Li}_{15}\text{Mn})\text{Mn}_{16}\text{O}_{32}$ структуры, где Li атом заменен атомом Mn , подтверждают существенные антиферромагнитные взаимодействия между цепочками Mn , а присутствие антиструктурных дефектов

приводит к появлению ферромагнитной компоненты, что согласуется с экспериментами.

Рис. 16 демонстрирует фрагмент кристаллической структуры LiMnO_2 и взаимное расположение орбиталей ионов Mn^{3+} и O^{2-} , обуславливающее косвенное 180° обменное взаимодействие (А.И. Курбаков, В.А. Трунов. *Solid State Sciences* **9**, 2007, 196–204; Изв. РАН. Сер. физ. **71**, 2007, 544–547).

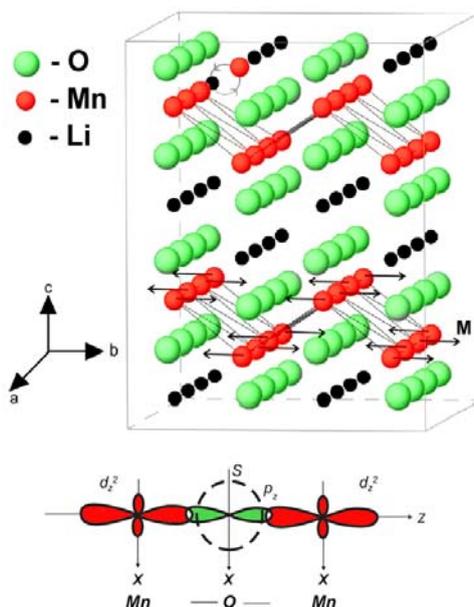


Рис. 16. Фрагмент кристаллической структуры LiMnO_2 и взаимное расположение орбиталей ионов Mn^{3+} и O^{2-}

Катализаторы

Результаты исследования платино-графитовых катализаторов, используемых в водородных топливных элементах, позволили оптимизировать их свойства. Было найдено, что оптимальный размер платиновой гранулы в катализаторе должен быть на уровне (3–5) нм. В первых образцах катализаторов этот размер был далек от оптимального (около 8 нм) (V.A. Trounov, V.T. Lebedev, Yu.S. Grushko *et al.* *Engineering Crystallography Reports* **52(3)**, 2007, 512–520).

Новые ионопроводящие материалы для водородных топливных элементов

Изучены свойства новых гидрогелей на основе взаимопроникающих сеток (ВПС), образованных из винил- и гидридсодержащих олигосилоксанов и поливинилового спирта (ПВС). Показано, что степень набухания сетки ПВС в воде,

определяемая природой и концентрацией сшивающего мономера, увеличивается аномально при повышении содержания звеньев сшивающего мономера. Установлено, что оптическая прозрачность материала достигается в системах с наиболее плотно сшитой силиконовой сеткой, в которой размер структурных элементов ВПС не превышает 100 нм. Методом малоуглового рассеяния нейтронов изучена структура гидрогелей, контрастированных путем набухания в тяжелой воде, что позволило изучить распределение системы заполненных водой наноскопических пор в сетке гидрогелей. Построена многоуровневая структурная модель гидрогелей в виде сложной упаковки насыщенных водой пор диаметром ~ 10 нм, которая согласуется с данными атомно-силовой микроскопии. Рассмотрена структура ионообменных материалов на основе ВПС. Исследования показали, что на их основе могут быть разработаны новые материалы для мембран топливных водородных элементов.

С.С. Иванчев, В.Н. Павлюченко, О.Н. Примаченко, В.А. Трунов, В.Т. Лебедев, Ю.В. Кульвеллис, Д.Н. Орлова. Гидрогели на основе взаимопроникающих полимерных сеток. Препринт ПИЯФ–2770, Гатчина, 2008.

Проблема колоссального магнитосопротивления (КМС)

Интерес к манганитам ($R^{3+}_{1-x}A^2_x$)MnO₃ возрастает в связи с наличием в них колоссального отрицательного магнитосопротивления и множества структурных и магнитных фазовых переходов. В прикладном значении эффект магнитосопротивления в перовскитах – манганитах на много порядков больше, чем в пленочных элементах, используемых в электронной промышленности. Исследователи обращают внимание на неоднородности в этих системах и предполагают, что магнитные неоднородности являются неотъемлемым и фундаментальным свойством этих материалов и ответственны за КМС.

Была исследована кристаллическая структура, решеточная и магнитная мезоструктура в образцах ¹⁵⁴Sm_{1-x}Sr_xMnO₃ (x = 0,25; 0,4) (ЖЭТФ **118**, 2000, 1174).

Был обнаружен структурный фазовый переход и расщепление решеточных постоянных "a" и "b" (рис. 17), а также изменение расстояния между атомами Mn и O в области температур T < 180 К. Решеточные константы испытывают температурный гистерезис в области T = 90–175 К. В этой области T обнаружен эффект микродеформации решетки. Анизотропная деформация в направлении "b" (STR2) и изотропная лоренциановского вида деформация (X) показаны на рис. 18. Из этих данных следует, что в образце должны существовать значительные решеточные и магнитные неоднородности.

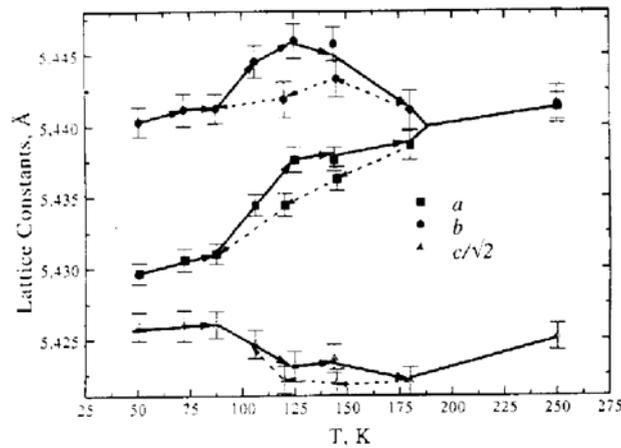


Рис. 17. Температурная зависимость решеточных констант. Стрелки указывают направление изменения температуры (охлаждение или нагревание). Сплошная линия проведена "на глаз"

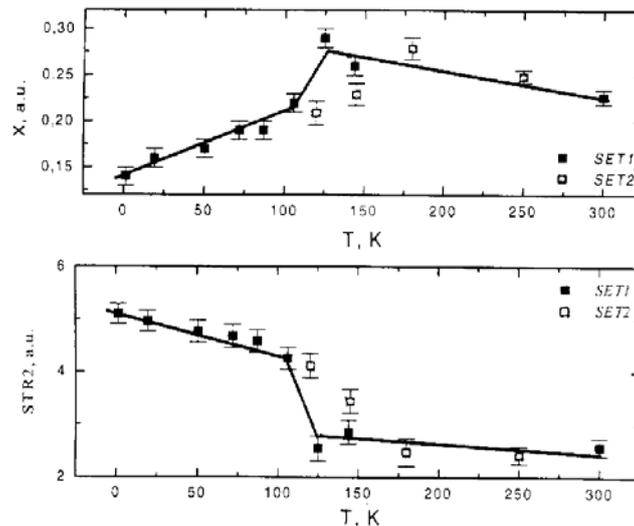


Рис. 18. Температурный ход параметров микродеформации: SET1 соответствует нагреванию, SET2 – охлаждению. Сплошная линия проведена "на глаз"

В экспериментах по малоугловому рассеянию в образцах $^{154}\text{Sm}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0,25; 0,4$) изучалась решеточная и магнитная мезоскопическая структура в области $T = 16\text{--}300$ К и в приложенных магнитных полях $H = 0\text{--}4200$ Э.

Были измерены температурная и полевая зависимости интенсивности малоуглового рассеяния при разных полях и получено, что:

1. интенсивность рассеяния $I_m(q)$ хорошо описывается квадратичным Лоренцианом $I_m(q) = A(q^2 + \kappa^2)^{-2}$, где A и $\kappa = 1/R_c$ – параметры;
2. низкотемпературное магнитное состояние Sm системы характеризуется сильным магнитным беспорядком с флуктуациями размером $R_c = 180\text{--}250 \text{ \AA}$. Более того, эти флуктуации объединяются в кластеры с размером не менее $(4\text{--}5)R_c$.

Фазовое разделение и магнитосопротивление в сложных манганитах

Структурные и физические свойства электронно-легированных $Sm_{0.1}Ca_{0.9-x}Sr_xMnO_3$ перовскитных манганитов ($0 \leq x \leq 0,8$) были изучены комбинацией рентгеновской и нейтронной дифракции с измерениями намагниченности (в статических или импульсных магнитных полях), магнитной восприимчивости и удельного сопротивления. При комнатной температуре наблюдается структурное превращение от $Pnma$ (при $x \leq 0,4$) к $I4/mcm$ (при $0,5 \leq x < 0,8$). Детальное изучение двух соединений ($x = 0,3$ и $0,6$), принадлежащих к каждой структурной области, демонстрирует при низких температурах различные фазовые разделения, со смесями C - и G -типа антиферромагнетизмов, связанных с различными кристаллографическими структурами ($P2_1/m$ для $x = 0,3$ и $I4/mcm$ для $x = 0,6$). В результате продемонстрировано, что в Mn^{+4} обогащенных манганитах свойства магнитосопротивления могут быть оптимизированы химическим давлением. На рис. 19 представлена магнитная и структурная фазовая диаграмма, построенная на основе нейтронных, магнитных и транспортных измерений. Наблюдается четкая корреляция между структурами и свойствами в этой $Mn^{+3.9}$ серии (А.И. Курбатов и др. Phys. Rev. B 77, 2008, 054402).

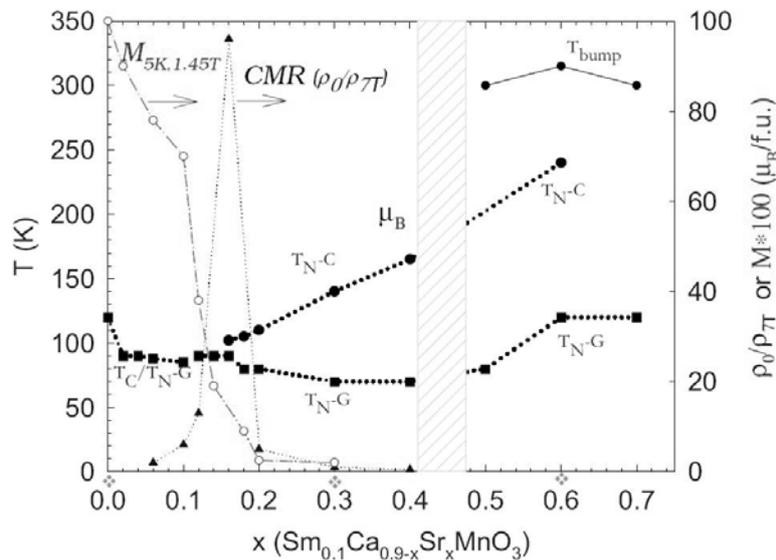


Рис. 19. Магнитная и структурная фазовая диаграмма

Обнаружение рассеяния поляризованных нейтронов на тяжелофермионной системе

Сечение рассеяния нейтронов на электронах проводимости пропорционально $(m^*/M)^2$, где m^* – эффективная масса электронов (носителей) и M – масса нейтрона. Для обычных металлов этот фактор порядка 10^{-5} – 10^{-6} и нейтронно-электронное рассеяние пренебрежимо мало. Однако для тяжелофермионных соединений $m^* \sim 100 m_e$ (R.J. Elliott. Proc. Roy. Soc. A, **235**, 1956, 298) и $(m/M)^2 \sim 10^{-2}$. В таких случаях данное рассеяние может быть наблюдаемо. И оно наблюдалось в экспериментах Г.П. Копицы на монокристалле $CeRu_2Si_2$ методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. Измерения проведены на двух длинах волн нейтронов $\lambda = 8,1$ и $10,5 \text{ \AA}$ с $\Delta\lambda/\lambda = 10\%$. Диапазоны переданных импульсов $5 \cdot 10^{-3} < q < 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ \AA}^{-1}$, магнитных полей $0 \leq H \leq 2,5 \text{ Т}$ при температурах $T = 0,15 \div 1$ и 295 К . В магнитных полях порядка 1 Т и $T \sim 1 \text{ К}$ был **зафиксирован факт появления малоуглового рассеяния**, зависящего как от величины и направления приложенного к образцу поля, так и от кристаллографической ориентации образца. На другом тяжелофермионном соединении $CeAl_3$ наблюдалось рассеяние на ферромагнитных или спин-стекольных корреляциях (G.P. Kopitsa, S.V. Grigoriev *et al.* Abstracts of conference Deutsche Neutronenstreutagung, 14–17 September 2008, Garching, Germany, 202).

Надмолекулярные структуры

Для изучения надатомной структуры конденсированных сред масштаба 20 – 1000 \AA (биологические объекты, полимеры, коллоидные системы, объекты материаловедения и пр.) по инициативе (и приказу) Г.М. Драбкина был создан малоугловой нейтронный дифрактометр "Мембрана" (М.М. Агамалян, Г.А. Евмененко, В.Л. Алексеев). Прибор оснащен поляризующей системой с магнитным монохроматором на основе пространственного спинового резонанса (ПСР) Драбкина, многосчетчиковой детекторной системой из 41 нейтронного счетчика СНМ-50 и Cd маской с узкими щелями, которая позволяет сканированием в пределах 12 мм изменять угловое разрешение детекторной части установки от $1,5 \cdot 10^{-3}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$ рад.

На этом дифрактометре была окончательно установлена структура фага T7 (М.М. Агамалян, кандидатская диссертация). Г.А. Евмененко и В.Л. Алексеевым проведены структурные исследования полиакрилатных супернабухающих гидрогелей при различных степенях набухания и проанализирована роль полиэлектролитных воздействий на конформацию полимерных цепей в районе узлов сшивки. С 1995 г. на "Мембране" работает группа В.Т. Лебедева, ныне доктора наук, с широкой программой исследования полимеров, их модификаций и сложных соединений, обладающих важными новыми свойствами. Например: соединения типа **фуллерен-порфири-полимер** – донорно-акцепторные комплексы (Д-А) с переносом заряда от макромолекул к фуллерену C_{60} . Проблема включения фуллерена в состав водорастворимых полимеров решена путем

повышения эффективности взаимодействия фуллерена с полимером – поли-*N*-винилпирролидоном (ПВП) за счет использования агента, имеющего сродство к фуллерену – тетрафенилпорфирина (ТФП), образующего комплексы с C₆₀ и ПВП в результате двухстадийного синтеза C₆₀-ТФП-ПВП-соединений. С помощью рассеяния нейтронов в диапазоне масштабов от полимерного звена до ~ 10³ нм найдены закономерности поведения этих объектов на микроуровне в растворах (упорядочение ансамблей комплексов в D₂O), построены структурные модели, которые могут послужить основой для разработок гибридных макромолекул с заданными функциональными свойствами из частиц разной природы (порфиринов, фуллеренов, различных атомных кластеров).

V.T. Lebedev, Gy. Torok, L. Cser, A. Len, D.N. Orlova *et al.* J. Appl. Cryst. **36**, 2003, 646–648.

Конформационный переход клубок-глобула

Использование фуллеренов в биологии и медицине ограничено трудностями введения их в водные среды (в воде фуллерены нерастворимы). Требуются производные для транспорта фуллерена в клетки (ткани) при сохранении его электронной структуры. Эта задача решается путем соединения фуллерена с водорастворимыми полимерами через невалентные связи. Сочетание свойств гидрофобных углеродных каркасов и гидрофильных полимеров создает уникальные наноматериалы, неизвестные в природе.

В ИВС РАН синтезированы комплексы поли-*N*-винилкапролактама (ПВКЛ, содержание в сухом полимере 1,8% масс. C₆₀). При нагревании выше T_c ~ 32°C ПВКЛ испытывает переход клубок-глобула и способен при этом захватывать молекулы из раствора. Таким способом достигается иммобилизация (инкапсулирование) ферментов, белков и живых клеток, которые в ПВКЛ-оболочках сохраняют функциональные свойства при нагревании до 70°C. Эти свойства ПВКЛ возможно усилить путем присоединения к нему фуллерена C₆₀ – акцептора электронов, что позволяет перевести фуллерен в водорастворимую форму. Методом малоуглового рассеяния нейтронов изучены структуры линейного ПВКЛ и комплексов ПВКЛ+C₆₀ в тяжелой воде (концентрация полимера 0,5% г/дл) в диапазоне 20–40°C, включавшем критическую область. Получены данные о размерах клубков глобул. Наблюдался новый необычный эффект упорядочения полимеров выше перехода клубок-глобула: локальное конформационное превращение в цепях ПВКЛ и комплекса, приобретающих вытянутые конформации на масштабе сегмента. Одновременно макромолекулы сжимаются по объему в 3 раза. В этих условиях в плотных глобулах возможны элементы нематического порядка в упаковке фрагментов размером масштаба длины сегмента.

V.T. Lebedev, Gy. Torok, E.Yu. Melenevskaya, L.V. Vinogradova, I.N. Ivanova. 8th Biennial Intern. Workshop "Fullerenes and atomic clusters", July 2–6, 2007, St.-Petersburg, Abstracts, p. 19.

Структура стали и сварного шва

Сварной шов сканировался тонким нейтронным пучком, и измерялось малоугловое рассеяние в основном металле и материале шва. Измеренные сечения рассеяния показали наличие трех типов дефектов (радиусы инерции $R_{g1} \sim 20$ нм, $R_{g2} \sim 9$ нм и $R_{g3} \leq 1$ нм – ”точечные” дефекты), количество которых резко различалось в зоне основного металла и внутри шва (рис. 20). В шве число частиц первого и второго типа было в ~ 5 раз меньше, чем в основном металле, а количество точечных дефектов находилось на минимальном уровне чувствительности. Из анализа данных в предположении, что частицы размером $R_{g2} \sim 9$ нм являются карбидами $Cr_{23}C_6$, определено их объемное содержание в основном металле $C = 0,1\%$, что соответствует массовой доле углерода $C_C = 0,05\%$, близкой к его полной концентрации ($C = 0,07\%$ мас.) в данной стали. В металле шва только $0,01\%$ мас. углерода связано в карбидах. Наблюдаемый размер крупных частиц $R_{g1} \sim 20$ нм согласуется с моделью кластеров малых частиц в виде монослоев на границах кристаллических блоков.

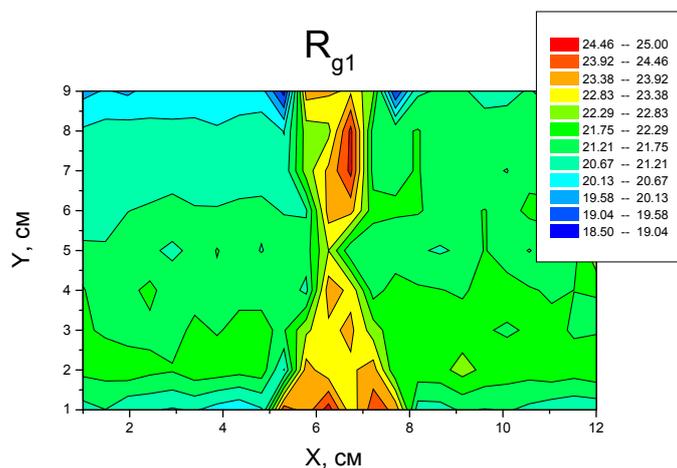


Рис. 20. Радиус инерции крупных частиц (шкала в нм)

Оптимизация фотодинамической терапии онкологических заболеваний

Впервые синтезированы и исследованы методом малоуглового рассеяния нейтронов наноразмерные комплексы феррочастиц с сенсibilизатором ”фотодитазин”, использующимся в фотодинамической терапии в онкологии. Определена структура комплексов, исследовано влияние на них биосовместимого полимера плюроника. Установлено, что плюроник перестраивает структуру магнитной жидкости из цепных образований в компактные наноразмерные кластеры. Полученные комплексы остаются стабильными длительное время, что

важно для применения в медицине. Клинические испытания на культурах опухолевых клеток и на крысах показали, что фотокаталитические свойства фотодитазина в комплексе с магнетитом сохраняются, а эффективность препарата увеличивается по сравнению с исходным фотодитазинном. Наличие плуроника еще более увеличивает эффективность. Синтезированные комплексы могут быть использованы в качестве первого магнитоуправляемого сенсбилизатора в фотодинамической терапии, а также в методе гипертермии при лечении онкологических заболеваний.

Ю.В. Кульвелис, В.А. Трунов, В.Т. Лебедев, Д.Н. Орлова, М.Л. Гельфонд. Журнал "Поверхность" (в печати).

Модификация материалов нейтронным облучением

В группе радиационной физики твердого тела Р.Ф. Коноплевой (Р.Ф. Коноплева, С.П. Беляев, И.В. Назаркин, В.А. Чеканов) проводились исследования модификации структуры и свойств материалов нейтронным облучением в низкотемпературной гелиевой петле реактора ВВР-М. Получены многочисленные данные, показывающие возможность направленного изменения свойств облучаемых материалов, используемых в реакторостроении, космической технике и общей промышленности.

1. При исследовании изменений электрофизических свойств ВТСП материалов (YBCuO-керамики и пленок) в процессе низкотемпературного (20 К) нейтронного облучения в области флюенсов быстрых ($E > 0,1$ МэВ) нейтронов $F = 10^{17}-10^{18}$ см⁻² обнаружен «эффект малых доз» (рис. 21), связанный с повышением критической температуры T_c от 92,3 до 95,3 К. При исследовании критического тока в Y-Ba-Cu-O-пленках получены его температурные и дозовые зависимости [1].

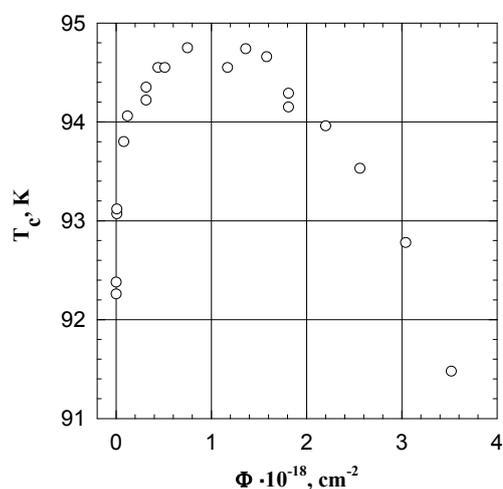


Рис. 21. Дозовая зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода YBaCuO керамики

2. Исследована модификация электрофизических свойств композитов на основе наноалмазов с пироуглеродом (NDC), облученных быстрыми нейтронами реактора ВВР-М. Измерены температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ исходных и облученных флюенсами быстрых нейтронов $\Phi(\text{см}^{-2})$: $5 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{18}$ образцов NDC с объемным содержанием пироуглерода 5% (NDC-10). Показано, что температурная зависимость $\rho(T)$ в необлученных образцах имеет степенной характер с показателем степени $n_0 \approx 3,2$. Нейтронное облучение приводит к увеличению n_0 пропорционально дозе облучения.

3. Экспериментально обнаружено, что в сплаве TiNi с памятью формы при облучении в области температур, меньших 340 К, происходит понижение температур мартенситных превращений и увеличение электросопротивления. Аналогичные изменения наблюдали в сплаве Cu-Al-Ni. Показано, что такие изменения свойств связаны с уменьшением степени дальнего порядка в упорядоченных сплавах. В неупорядоченном сплаве Mn-Cu с памятью формы кинетика превращений и электрофизические характеристики остаются неизменными при облучении.

4. Благодаря использованию методики непрерывного измерения свойств материалов в процессе облучения впервые установлено, что при $T_{\text{обл}} \leq 340$ К в сплаве TiNi температуры мартенситных превращений экспоненциально снижаются с нарастанием дозы нейтронов и уже при малых флюенсах (до 10^{18} см^{-2}) происходит существенное изменение температурной кинетики превращений.

5. Установлено, что основными факторами, влияющими на изменение температур мартенситных переходов при нейтронном облучении, являются разупорядочение твердого раствора TiNi при низкотемпературном облучении, радиационное упорядочение в процессе высокотемпературного облучения и термостимулированный отжиг радиационных повреждений. В соответствии с этим определен вид дифференциального уравнения для скорости изменения критических температур фазовых переходов в TiNi. Результаты компьютерных расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными и позволяют прогнозировать поведение сплава при облучении флюенсом быстрых нейтронов до $7 \cdot 10^{18} \text{ н/см}^2$ в широком интервале температур от 120 до 480 К.

6. Несмотря на сильные изменения кинетики мартенситных превращений, облучаемый нейтронами сплав TiNi демонстрирует эффект памяти формы и сохраняет способность к накоплению и возврату большой неупругой деформации. Впервые экспериментально показано, что эффект памяти формы в сплаве TiNi может быть стимулирован не только изменением температуры, но и нейтронным облучением [2].

7. Разработано техническое предложение на технологическую линию облучения и исследование образцов в низкотемпературной гелиевой петле на реакторе ПИК (НТГП).

1. Р.Ф. Коноплева, Б.А. Борисов, И.В. Назаркин, В.А. Чеканов. Физика твердого тела **40(11)**, 1998, 1961.

2. С.П. Беляев, А.Е. Волков, Р.Ф. Коноплева и др. Физика твердого тела **43(11)**, 2001, 2070.

Магнитная текстура пленок

Терромагнитная обработка обычно понимается как метод изготовления постоянных магнитов при отжиге заготовки во внешнем магнитном поле. Анизотропные пленки Fe-Co, полученные методом магнетронного распыления, оказываются намагниченными, и после их отжига ранее было обнаружено значительное возрастание индукции. В настоящее время понятно, что механизм этого явления такой же, как и при терромагнитной обработке массивных материалов. Но анизотропные пленки с остаточным магнитным моментом позволяют наиболее полно использовать возможности пучков поляризованных нейтронов.

В лаборатории В.В. Рунова (к. физ.-мат. наук А. Ковалев и др.) на установке "Вектор" ведутся тщательные исследования магнитных пленок. Например, на пленках состава Co(67)Fe(31)V(2) толщиной 2,5 мкм выполнены измерения поляризации прошедшего образец пучка и параметров малоуглового рассеяния. Измерения велись в процессе отжига образцов и в малых магнитных полях, которые не влияют на магнитную текстуру образцов. По значению поляризации определялась величина индукции пленок, а изменения параметров малоуглового рассеяния позволяют судить о состоянии их магнитной текстуры.

Основные результаты: 1) после отжига (время порядка 3 ч.) при $T \approx 200^\circ\text{C}$ в пленках наблюдается рост индукции примерно в два раза; 2) обнаружена корреляция изменений индукции и параметров малоуглового рассеяния; угловое распределение пиков отражения и рассеяния (рис. 22) имеет сложный характер, включает зеркальное отражение и незеркальное с переворотом поляризации, которое, скорее всего, связано с зеemannовским расщеплением нейтронной волны в достаточно крупных доменах.

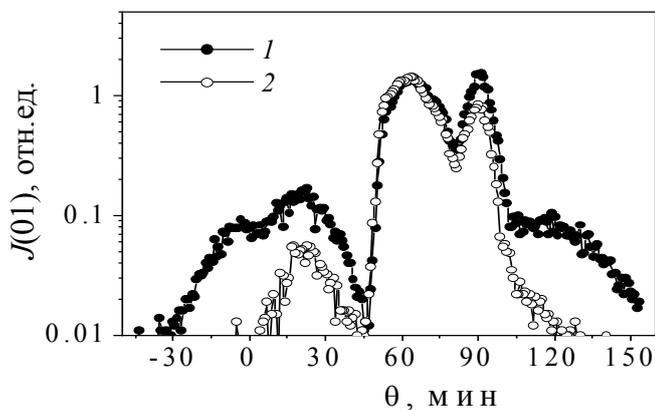


Рис. 22. Угловые распределения интенсивностей рассеянных нейтронов после изготовления (кривые 1) и кратковременного намагничивания образца (кривые 2) в поле $H = 800 \text{ Э}$; измерения при $H = 7 \text{ Э}$, зеркальное отражение при $\theta \approx 91^\circ$

Результат важен для корректного учета этого эффекта в рефлектометрических исследованиях магнитных материалов.

А.В. Ковалев. О проблеме переворота спина нейтрона в ферромагнитных пленках. Препринт ПИЯФ–2777, Гатчина, 2008, 9 с.

Фуллерены, металлофуллерены и их свойства

Фуллереновая проблема решается в лаборатории **Ю.С. Грушко** (В.С. Козлов, В.А. Шилин, В.П. Седов и др.). Лаборатория химии и спектроскопии материалов была создана в 1989 г. с целью поддержки исследований на реакторе ВВР-М при изготовлении и аттестации образцов, необходимых в нейтронных экспериментах. Открытие фуллеренов полностью охватило тематику лаборатории, результаты которой высоко котируются в России и в мире. Лабораторией Ю.С. Грушко опубликовано более 80 научных работ, имеются авторские свидетельства и патенты. Разработана детальная технология **промышленного получения фуллеренов C₆₀ и C₇₀ высокой чистоты.**

Один из недавних результатов продемонстрирован на рис. 23. Он касается синтеза и выделения редкоземельных металлофуллеренов Eu@C₈₂ и Tm@C₈₂ для исследования процессов релаксации этих молекул после захвата нейтрона ядром инкапсулированного атома. Для Eu@C₈₂ предполагается аномальная локализация атома Eu внутри углеродного кейджа.

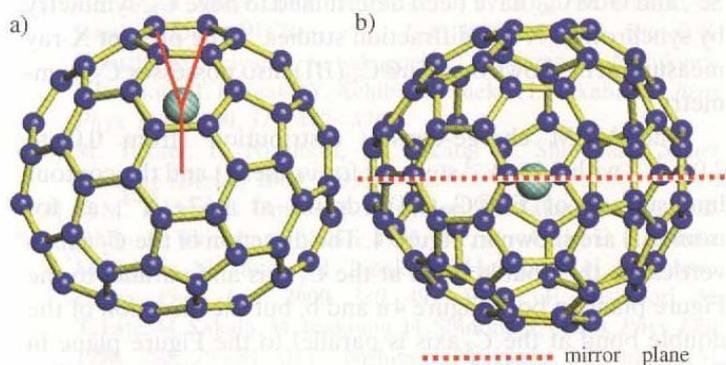


Рис. 23

Увеличение величины удерживания атома в кейдже имеет большое практическое значение для получения медицинских радиопрепаратов, а также фундаментальное значение для понимания всей цепочки процессов распада возбужденного атома в условиях конфайнмента.

При изучении магнитнорелаксационных свойств систем на основе гидроксометаллофуллеренов **гадолиния** получены следующие результаты:

- Синтезированы и сформированы системы, состоящие из смесей гидроксированных пустых фуллеренов и металлофуллеренов гадолиния, обладающие большим магнитнорелаксационным эффектом.

- Разработан высокочувствительный нейтрон-радиационный метод определения гадолиния в водорастворимых диагностических препаратах.
- Методом малоуглового рассеяния нейтронов оценены средние размеры агрегатов гидроксофуллеренов при pH 7 в водных растворах.
- Разработаны новые методы обогащения и гидроксирования металлофуллеренов гадолиния.
- Показано, что в условиях микротомографии *in-vitro* и полномасштабной томографии на крысах релаксивность ($1/T_1$) полученных препаратов в **15–30 раз превосходит** таковую для стандартных используемых в медицине препаратов "Гадовист" и "Магневист" (Schering).

Ю.С. Грушко, В.П. Седов, В.С. Козлов, Е.В. Цирлина. Способ получения MRI – контрастирующего агента. Заявка на патент, рег. № 2008142608 с приоритетом от 27.10.2008. Роспатент.

Новые методические и приборные разработки

Мы медленно, но поступательно приближаемся к пуску реактора ПИК. Не исключено и продление работы реактора ВВР-М с источником ультрахолодных нейтронов, на котором планируется место и под холодные нейтроны с твердотельскими установками. Важно прийти к новым источникам с новыми установками и частично старыми, но существенно модернизированными.

Новая установка "Реверанс" – рефлектометр с вертикальной плоскостью отражения создается сейчас группой Г.П. Гордеева. Это будет, пожалуй, единственный в России рефлектометр для исследования поверхностных явлений жидких образцов с рассеянием (отражением) нейтронов вверх.



Прибор позволит проводить исследования физико-химических и биологических процессов, проходящих как на свободной поверхности, так и на границах раздела фаз в разного рода жидких системах, контактирующих с твердым телом, газом или с другой жидкостью (органические и неорганические однокомпонентные жидкости; растворы; суспензии и коллоидные растворы)

наночастиц и т. д.), что является важным как с научной, так и прикладной точек зрения.

Важным изобретением было создание **нейтрон-защитного материала без водорода**. По инициативе И.М. Лазебника разработан и изготовлен такой материал на основе Li^6 и B^{10} . Совместно с СКТБ "Технолог" такая защита выпускается в различных видах и на нее получено 3 патента. Материал в виде пасты на базе неотвердевающего полиэтилена с различными наполнителями для поглощения нейтронного и гамма-излучений (Li^6F , B^{10} , Pb , W и т. д.) пригоден для замазывания щелей или защиты деталей сложной конструкции. Материал в виде тонких листов эластичного полиэтилена используется для коллимации и подавления фонового излучения в физических приборах на нейтронных пучках. К сожалению, дороговизна изотопа лития-6 ограничивает использование такого материала в России, но он в довольно большом количестве потребляется зарубежными нейтронными центрами.

По части поляризующей техники необходимо с благодарностью отметить **Отдел нейтронной оптики** (руководитель А.Ф. Щebetов, ныне А.П. Булкин) и всех его сотрудников. Почти 50 лет все щebetовцы радовали нас новыми поляризующими игрушками. На многих зарубежных, а не только наших установках, стоят зеркала, нейтроноводы, бендеры и пр. производства ПИЯФ. Прогресс в этом направлении продолжается, пример тому работа Н.К. Плешанова **"Новый метод улучшения нейтрон-поляризующих покрытий"**:

Предложен и экспериментально подтвержден новый метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий, основанный на подавлении отражения нейтронов с нежелательным спином за счет использования на границах слоев поляризующего покрытия прослоек с отрицательным потенциалом ("антибарьерных слоев"). При использовании прослойки Ti показано, что метод позволяет подавить отражение нейтронов с нежелательным спином на порядок величины по сравнению с существующими покрытиями.

Преуспели в методике и С.В. Григорьев с Ю.О. Четвериковым (лаб. В.В. Рунова). В их работе на 14 канале ВВР-М экспериментально и теоретически исследовалось **явление многократной нейтронной интерференции**, которое основано на Рамзеевском резонансном методе "раздельных осциллирующих полей". Нейтрон проходит через систему из N резонансных катушек, которые переворачивают спин нейтрона с вероятностью ρ меньше единицы, разделенных промежутками с постоянным полем \mathbf{B} . Поскольку $\rho < 1$, то после каждого флиппера число волн удваивается и в конце системы составляет $2N$. В результате попарной интерференции многих волн наблюдается высокорегулярная интерференционная картина кванто-механической вероятности в $(\rho, \Delta\mathbf{B})$ -пространстве, где $\Delta\mathbf{B}$ – фаза прецессии в постоянном магнитном поле. Эти результаты могут быть использованы для совершенствования техники нейтронного дифракционного эксперимента, т. к. позволяют получить голографическую картину исследуемого объекта.

S.V. Grigoriev, Yu.O. Chetverikov, A.V. Syromyatnikov *et al.* Phys. Rev. A **68**, 2003, 033603.

Установка ультрамалогоуглового рассеяния SESANS

В лаборатории В.В. Рунова (С.В. Григорьев, Ю.О. Четвериков, Л.А. Аксельрод и др.) создается установка SESANS (Спин-Эхо малоугловое рассеяние нейтронов).

Принципиальная схема установки SESANS показана на рис. 24. В основе установки лежит метод Спин-Эхо, но вместо энергетического анализа измеряется угол рассеяния с использованием скошенной геометрии магнитных полей прецессии вектора поляризации нейтронов.

Пробег нейтронов в поле прецессии \mathbf{B} для падающих и рассеянных нейтронов различен (см. рисунок) и эта разница по принципу Спин-Эхо кодируется в сдвиге фазы прецессии поляризации $\Delta\varphi = \varphi(\mathbf{P}_f) - \varphi(\mathbf{P}_0)$. Из-за высокой чувствительности Спин-Эхо метода к $\Delta\varphi$ возможно изучать рассеяние нейтронов на секундные углы в пределах расходимости прямого пучка и получать информацию о рассеивающих неоднородностях в диапазоне размеров от сотен Ангстрем до микронных, что принципиально важно для исследования материалов, физические свойства которых связаны с мезоструктурой.

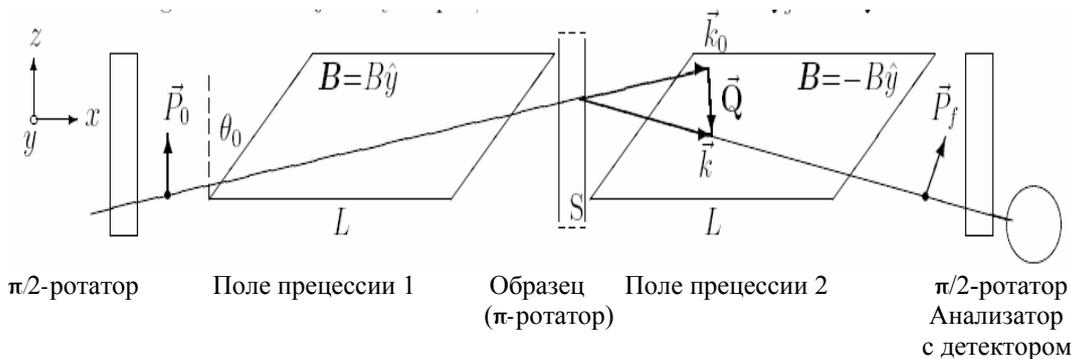


Рис. 24. Принципиальная схема SESANS (СЭМУРН)

Основным достижением в преддверии **полувекового юбилея** реактора ВВР-М является создание собственного, институтского, **мультидетектора нейтронов**. Он создан под руководством А.Г. Крившича его сотрудниками и благодаря настоятельной инициативе В.В. Рунова.

Честь им и хвала за такой подарок!

Двухкоординатный детектор 300 мм × 300 мм

В настоящее время закончена работа по созданию детектора с апертурой 300 мм × 300 мм и проводятся его испытания (рис. 25, 26). Детектор наполнен газовой смесью 2 атм. ^3He + 2 атм. CF_4 . В конструкцию детектора были заложены следующие характеристики: эффективность регистрации 70÷80% ($\lambda = 9 \text{ \AA}$), пространственное разрешение $\text{FWHM} = 1,5 \text{ мм}$ (вдоль непрерывной координаты Y) и $\text{FWHM} = 2 \text{ мм}$ (вдоль дискретной координаты X).

На данный момент измерены следующие характеристики детектора: внутреннее разрешение $\text{FWHM} \leq 0,4 \text{ мм}$, энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{FWHM}}/E_{\text{полн}} = 30\%$.

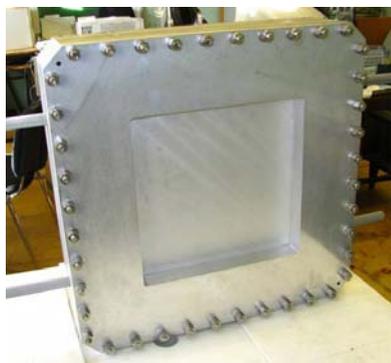


Рис. 25. Двухкоординатный детектор с чувствительной областью $300 \text{ мм} \times 300 \text{ мм}$

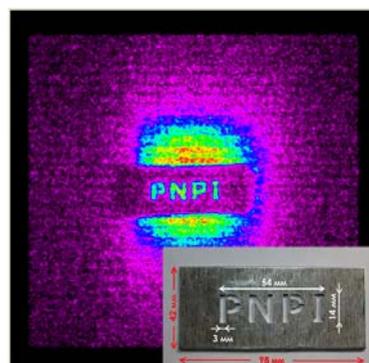


Рис. 26. Двумерный спектр, полученный при облучении рассеянным пучком нейтронов (источник Cf-252) пластины кадмия с аббревиатурой "PNPI"

Как уже упоминалось вначале, физики-экспериментаторы были тесно связаны с сотрудниками сектора С.В. Малеева (теперь сектор С.Л. Гинзбурга), которые проводили теоретическое изучение проблем, возникающих при исследовании конденсированных сред методом нейтронного рассеяния, и возможностей постановки новых экспериментов. Невозможно перечислить все, что они сделали за 50 лет, но некоторые фрагменты последних лет надо отметить.

- Создание микроскопической теории спиновых волн и реакции спиральной структуры на внешнее магнитное поле кубических магнетиков без центра инверсии. Полученные в ней результаты явились основой для экспериментального изучения поведения спиральной структуры MnSi в магнитном поле.
- Изучено поведение магнитной структуры и критических флуктуаций в MnSi около точки фазового перехода с $T_C = 29 \text{ К}$. Особое внимание было обращено на повороты оси спирали в магнитном поле. В частности, удалось показать, что обсуждавшаяся "спиновая нестабильность в поле" является в действительности поворотом оси спирали.
- Теоретически найдена спин-волновая щель $\Delta = 0,1 \text{ Т}$. Эта щель определяет однородную магнитную восприимчивость в слабых полях, перпендикулярных оси спирали, и появление второй гармоники во вращении спинов.
- Изучена страйповая фаза, возникающая в интервале полей $H_1 < H < H_2$, где H_2 – поле насыщения в модели двумерного ферромагнетика с дипольными силами и с сильной анизотропией типа легкая ось, перпендикулярной плоскости решетки.
- Вычислен спектр коротковолновых магнонов в двумерном антиферромагнетике на квадратной решетке при $T = 0$ в сильном магнитном поле. Предложен новый метод проведения подобного рода аналитических вычислений в двумерных системах.

- Показано, что квадрат спин-волновой щели является суммой двух слагаемых. Первое положительно. Оно возникает из-за взаимодействия спиновых волн. Второе обусловлено магнитоупругим взаимодействием и меньше нуля. Оценки, основанные на имеющихся экспериментальных данных, показывают, что оба вклада сравнимы по величине. Высказано предположение, что их конкуренция под влиянием давления должна приводить к квантовому фазовому переходу в неупорядоченное состояние, наблюдавшееся в MnSi и FeGe.

Успехи по нейтронной тематике Отдела ИКС наиболее ярко видны из защищенных более 30 кандидатских и 9 докторских диссертаций.

Кандидатские диссертации и их темы:

1. А.И. Окороков. Фазовый переход в Ni и поляризованные нейтроны. 1969.
2. В.П. Плахтий. Магнитный порядок в двухподрешеточном ферримагнетике. 1973.
3. Я.А. Касман. Фазовый переход в железо-иттриевом феррите-гранате. 1973.
4. Е.И. Забидаров. Нейтронный анализ магнитного упорядочения вблизи T_C . 1976.
5. И.В. Голосовский. Исследование антиферромагнитных гранатов с 3d-ионами. 1978.
6. А.Ф. Щебетов. Поляризующие нейтроноводы на базе зеркал CoFe /TiGd. 1979.
7. М.М. Агамалян. Исследование структуры фаза Т-7. 1979.
8. В.В. Рунов. Поляризационные эффекты и критическое рассеяние нейтронов в Fe. 1980.
9. Г.П. Гордеев. Магнитное упорядочение разбавленных сплавов Pd-Fe. 1980.
10. А.Г. Гукасов. Асимметрия магнитного рассеяния поляризованных нейтронов. 1981.
11. А.В. Ковалев. Фазовые переходы в борацитах. 1981.
12. В.Е. Михайлова (Болгария). Статика и динамика аморфных сплавов на основе Fe-Ni. 1983.
13. Ю.П. Черненко. Слабый антиферромагнетизм в ортоферритах. 1983.
14. О.П. Смирнов. Эффекты конкуренции обменных взаимодействий в гранатах. 1985.
15. А.И. Иоффе. Нейтронные интерферометры на дифракционных решетках. 1986.
16. В.Т. Лебедев. Сетчатые полимеры и метод поляризованных нейтронов. 1986.
17. Н.К. Жученко. Поляризационные фильтры нейтронов на основе ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^3He . 1988.
18. И.А. Зобкало. Магнитные свойства соединений R_2CuO_4 (R = La, Sr, Nd, Ce, Eu, Sm). 1992.
19. С.В. Григорьев. Критические явления в инварных Fe-Ni сплавах. 1998.
20. А.А. Воробьев. Структура феррожидкостей на основе частиц магнетита. 2002.
21. С.В. Гаврилов. Фазовые переходы в антиферромагнетиках, индуцированные магнитным полем. 2004.

22. Р.З. Ягуд, 23. И. Назаркин, 24. В.А. Кудряшев, 25. Д.Ю. Чернышов, 26. А.Е. Соколов, 27. И.И. Марчик, 28. В.А. Чеканов, 29. Е.В. Москвин, 30. В.Г. Сыромятников, 31. Н.К. Плешанов и др.

Докторские диссертации и их темы:

1. Г.М. Драбкин. Магнитное упорядочение и поляризованные нейтроны. 1971.
2. С.В. Малеев. Теория магнитного рассеяния поляризованных нейтронов. 1975.
3. А.И. Огороков. Критические явления и спиновая динамика ферромагнетиков высокой энергии. 1983.
4. В.А. Трунов. Исследование связи структурных особенностей и физико-химических свойств различных соединений современными дифракционными методами. 1998.
5. В.П. Плахтий. Спиновые структуры и взаимодействия магнитных атомов. 1983.
6. Р.Ф. Коноплева. Радиационные эффекты в полупроводниках при облучении частицами высоких энергий. 1984.
7. И.В. Голосовский. Дифракционные исследования атомного и магнитного порядка в антиферромагнетиках, наноструктурированных внутри пористых сред.
8. А.И. Курбаков. Корреляции кристаллических и магнитных структур манганитов с их физическими свойствами. 2006.
9. В.Т. Лебедев. Нейтронные исследования структурно-динамических свойств полимерных систем с фуллеренами и наночастицами. 2007.

Давно созрели докторские диссертации Г.П. Гордеева, В.В. Рунова, Ю.С. Грушко, С.В. Григорьева и др., но для них научный поиск выше желанья оформить докторскую степень.

Преимущество исследований в ОИКС значительна. Основной состав, сформировавшийся в 60-х, 70-х годах, почти полностью сохранился и регулярно пополняется молодыми кадрами. К сожалению, со времен "перестройки" в стране через ОИКС прошли десятки аспирантов, но остались только единицы – часть ушла в коммерцию "президентами" компаний, а часть пополняет кадрами зарубежные центры. Общая численность отдела за время перестройки сократилась **со 105 до 80**.

Мы часто забываем в своих публикациях поблагодарить сотрудников ФТР за их усердную работу по обеспечению нейтронных экспериментов. Кажется – это всем понятно, что нашими успехами мы обязаны реактору и его славной команде. Это относится и к экспериментам, выполненным на зарубежных реакторах, т. к. идеи зарождались при работе на нашем реакторе, где, как правило, проходило и их тестирование, а зарубежные реакторы только предоставляли высокую интенсивность нейтронов и экспериментальную технику.

Дорогие ФТРовцы, все физики-нейтронщики говорят вам СПАСИБО за безупречную 50-летнюю службу ради нашей общей цели – НАУКИ.

Естественно, что рядом с физиками всегда были и **электронщики, и программисты**, без которых ни один эксперимент не мог бы быть выполненным.

Они тоже не всегда попадали в соавторы физических публикаций, но **мы благодарны** им за то, что они, не жалея своего времени, всегда приходили на помощь в трудных ситуациях.

Добрая половина нашей техники физического эксперимента была выполнена руками наших **высококвалифицированных механиков**. Они не только на своем рабочем месте, но и всегда в нужную минуту при эксперименте, как на посту!

Огромное им **спасибо** за это.

Галерея начальных и нынешних лет

Молодые – старые



1 ряд: Г.М. Драбкин, А.И. Огороков, В.А. Трунов, Р.Ф. Коноплева, В.П. Плахтий;
2 ряд: Е.И. Забидаров, Г.П. Гордеев, И.М. Лазебник, Л.А. Аксельрод, Я.А. Касман;
3 ряд: Е.И. Мальцев, В.В. Рунов, А.Ф. Щebetов, Э.Б. Родзевич

Молодые – новые (и кто-то из них выполнит первый эксперимент на ПИКе)



1 ряд: С.В. Григорьев, Г.П. Копица, Е.А. Дядькина, В.А. Дядькин, А.П.Чумаков;
2 ряд: А.В. Васильева, Ю.А. Кульвелис, Ю.О. Четвериков, Е.В. Москвин;
3 ряд: В.В. Пиядов, Ю.А. Кибалин, Н.К. Юрченко