



Достижения школы поляризованных нейтронов в Гатчине за 2015 год в области ФКС

С.В. Григорьев

Петербургский институт ядерной физики



Polarized Neutron School in Gatchina

Topics

1. Diffraction of polarized neutrons for chiral magnetic structures

2. Small-angle scattering and reflectometry of polarized neutrons for magnetic nanostructures

3. New methods and technique with polarized neutrons



POLARIZED NEUTRONS – HISTORY



S.V. Maleev

Theory of polarized
neutron scattering



G.M. Drabkin

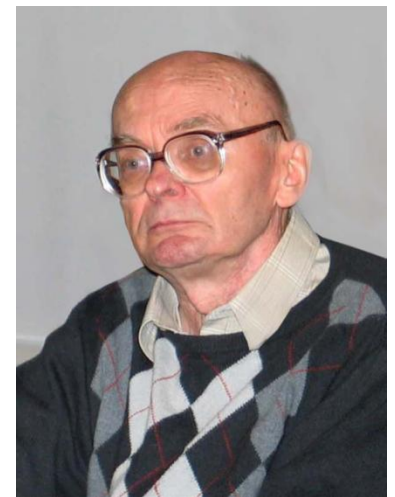
1922 - 2014

Polarized neutrons
scattering
monochromator,
spin-flippers, etc.



A.I. Okorokov

3-D polarization
Analysis and 2-nd order
phase transitions



V.P. Plakhty

1939 - 2009

Chirality in magnetic
crystals



POLARIZED NEUTRONS – PRESENT

Annual Polarized Neutron School at Petersburg Nuclear Physics
Institute NRC KI

**IV School on Physics of Polarized
Neutrons is planned at PNPI on
17-18 December 2015**
<http://oiks.pnpi.spb.ru/events/fpn-2015>

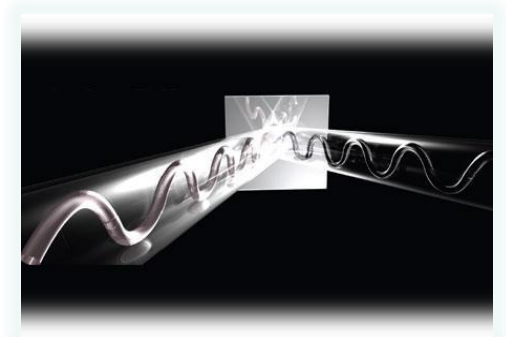




Polarized Neutron School in Gatchina:

3. New methods and technique with polarized neutrons

Группа нейтронной рефлектометрии
(Н.К. Плешанов)



Нейтронная Спин-Манипуляционная Оптика

Предложено новое направление нейтронной оптики – спин-манипуляционная оптика, основанная на квантовых аспектах взаимодействия нейтрона с магнитно анизотропными слоями и означающая переход от 1D (селекция спинов) к 3D (вращение спинов) в поляризационной нейтронной оптике.



Нейтронная Спин-Манипуляционная Оптика

Предложены решения, которые обеспечивают одновременно высокое отражение ($R \sim 1$) и слабую зависимость угла поворота спина от длины волны нейтрона и от угла скольжения. Открываются **новые возможности для манипуляций со спинами**. Нейтронные отражатели-вращатели спина (в частности, $\pi/2$ - и π -вращатели) могут как использоваться непосредственно, так и комбинироваться для создания 3D-поляризаторов, 3D-анализаторов, 3D-ротаторов (спиновых манипуляторов), гиперполяризаторов, квантовых прецессоров и антипрецессоров спина.

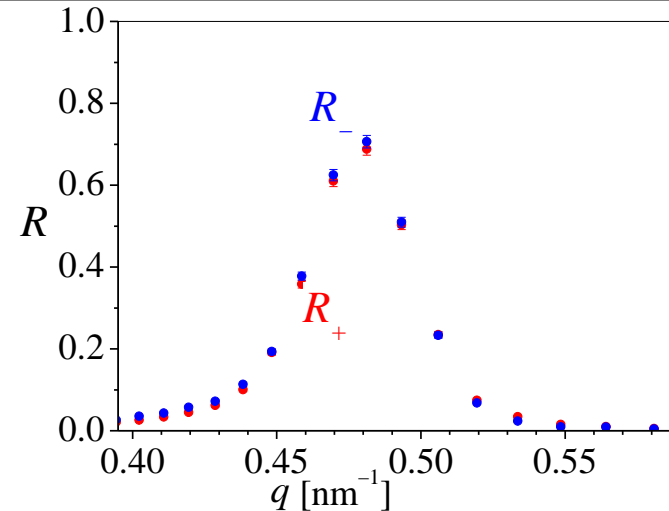
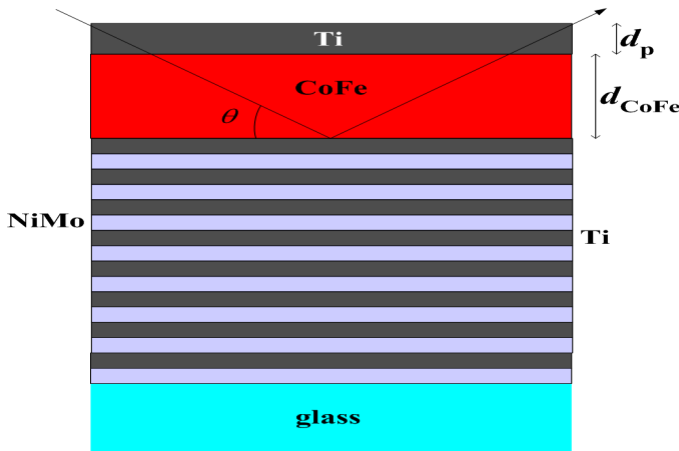
Предложенные гиперполяризаторы – новый тип поляризующих устройств, которые не только разделяют нейтроны с противоположными спинами, но и флиппируют «неправильные» спины, т.о. поляризуя до 100% нейтронов (с увеличением углового расхождения или ширины пучка – в соответствии с т. Лиувилля).

N.K. Pleshanov, J. Phys.: Conf. Ser. **528** (2014) 012023.
– Neutron spin manipulation optics: basic principles and possible applications.

Н.К. Плешанов, Поверхность **1** (2015) 28-39.
– Нейтронные отражатели-вращатели спина.



Первый нейтронный отражатель-флиппер



{NiMo(6.9nm)/Ti(6.1nm)}x20 - немагнитная периодическая многослойка, покрытая магнитно анизотропной пленкой CoFe толщиной 71.5 нм и защитным слоем Ti (30 нм) для предотвращения окисления.

Немагнитная периодическая структура обеспечивает выполнение условия $R_+ \cong R_-$ для брэгговского пика – необходимое условие вращения спина вокруг намагниченности верхней пленки CoFe. Толщина пленки CoFe такова, что спин вращается на угол π . Для флиппирования поляризации при отражении пучка остается повернуть образец так, чтобы намагниченность пленки была перпендикулярна слабому ведущему полю.

Измеренная эффективность первого отражателя-флиппера

0.978 ± 0.001



Polarized Neutron School in Gatchina:

1. Diffraction of polarized neutrons for chiral magnetic structures

Исследования мультиферроика $TbMn_2O_5$ методами
сферической нейтронной поляриметрии и
XYZ-поляризационного анализа

И.А. Зобкало, С.В. Гаврилов,

Е.К. Димакова, М.Д. Кучугура

Геликоидальный магнитный
порядок – источник электрической
поляризации.

Механизм?

Exchange striction:

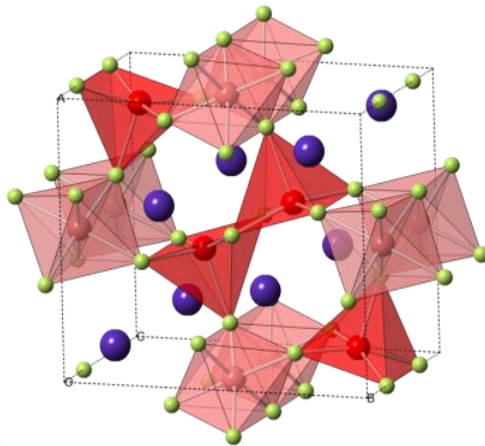
$$P \sim (S_1 \cdot S_2)$$

или

и

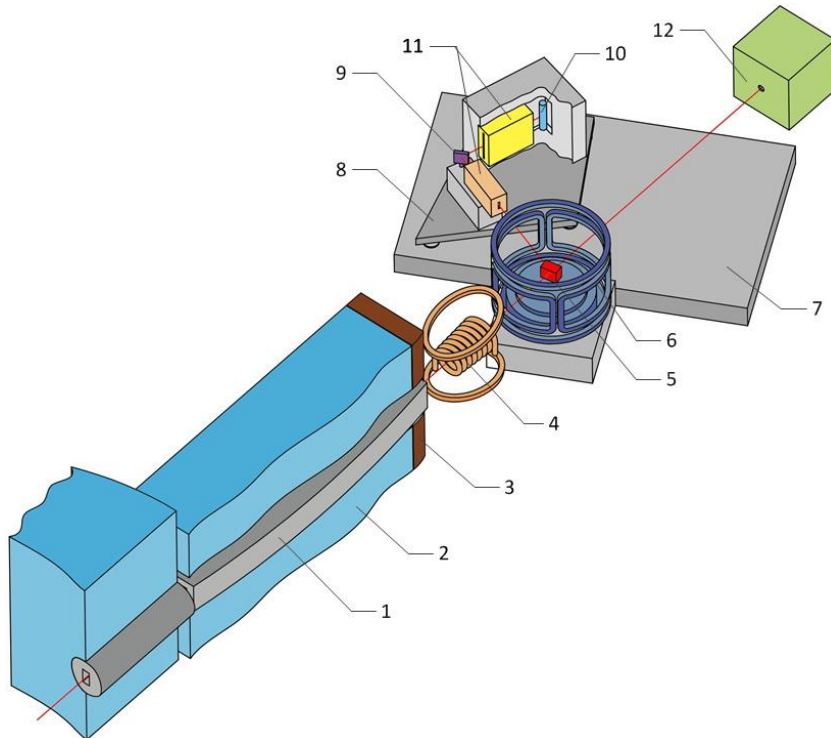
DMI:

$$P \sim e_{12} \times [S_1 \times S_2]$$





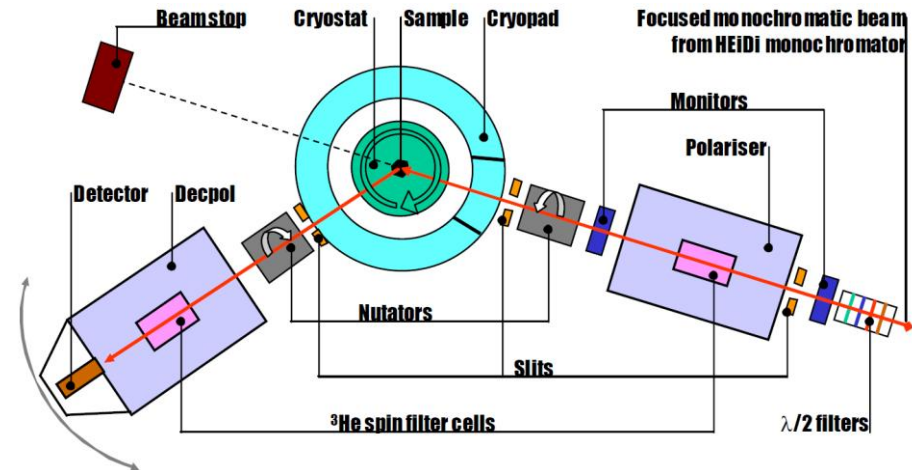
XYZ поляризационный анализ 6-й пучок ВВР-М



Сферическая нейтронная поляриметрия

Дифрактометр POLI

Реактор FRM-II, Мюнхен





Сферическая нейтронная поляриметрия

Измерены поляризационные матрицы во всех магнитоупорядоченных фазах для нескольких магнитных сателлитов в нулевом электрическом поле

Параметр эллиптичности

$$\mathcal{P}_{yy} = -\mathcal{P}_{zz} \sim \frac{\mu_u^2 - \mu_v^2}{\mu_u^2 + \mu_v^2}$$

0.51 0 2.31

-1.01(2)	0.02(2)	0.08(2)
-0.15(3)	0.73(2)	0.09(3)
-0.12(3)	0.02(3)	-0.80(3)

T=14K

Параметр киральности

$$\mathcal{P}_{yx} = \mathcal{P}_{zx} \sim \frac{2(1 - 2n_r)\mu_u\mu_v}{\mu_u^2 + \mu_v^2}$$

1.51 0 0.31

-0.96(3)	0.01(3)	0.04(3)
0.07(3)	-0.41(3)	0.04(3)
0.07(3)	-0.03(3)	0.45(3)

**! Результаты SNP
находятся в хорошем
согласии с результатами
XYZ !**

ПОКАЗАНО:

Во всех магнитных фазах наблюдалась неравновесная заселенность киральных доменов в соотношении примерно 62:38.



Сферическая нейтронная поляриметрия

Измерены киральные компоненты поляризационных матриц во всех магнитоупорядоченных фазах для нескольких магнитных сателлитов в электрическом поле 3kV

0.51 0 -2.31 T=7K

ZFC

1.08(9)		
0.14(3)	-0.77(7)	
0.18(3)		0.73(7)

FC(-3kV)

0.03(2)		
0.02(2)		

FC(3kV)

0.09(2)		

Параметр киральности

$$P_{yx} = P_{zx} \sim \frac{2(1 - 2n_r)R \cos \beta}{R^2 \cos^2 \beta + 1}$$

ПОКАЗАНО:

1. При охлаждении в поле 3 kV (~5 kV/cm) удавалось изменять заселенность доменов с различной киральностью.
2. При охлаждении в поле -3 kV заселенность доменов с «правыми» и «левыми» спиралями становилась одинаковой с точностью измерений.
3. При охлаждении в поле +3kV восстанавливалась неравновесная заселенность киральных доменов в соотношении ~ 0.58:0.42.

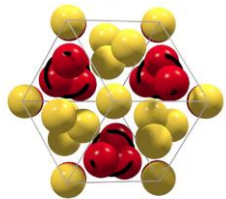
По результатам работы М.Д. Кучугура стала лауреатом премии им. И.В.Курчатова НИЦ «Курчатовский институт» за 2015 год среди студенческих работ.



Polarized Neutron School in Gatchina:

1. Diffraction of polarized neutrons for chiral magnetic structures

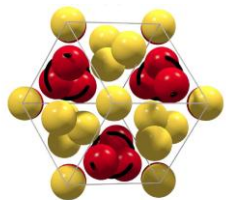
Crystal handedness and magnetic chirality in B20 compounds determined by PoLSANS



MnSi-etalon

$$u_{\text{Mn}} = 0.135$$

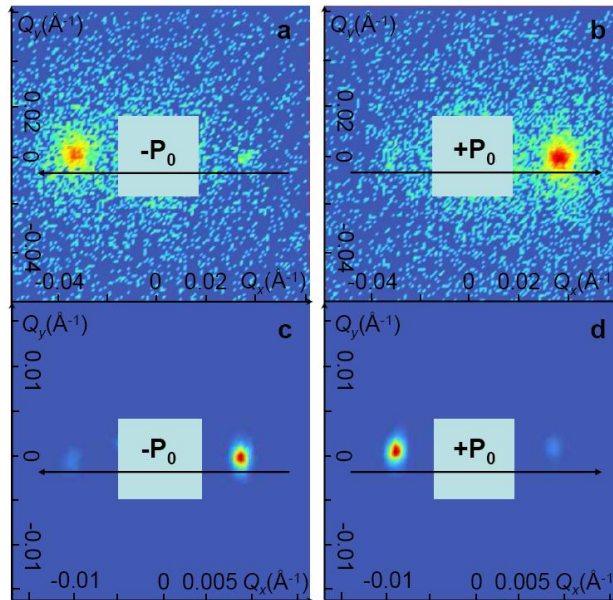
$$u_{\text{Si}} = 0.845$$



FeGe-sample

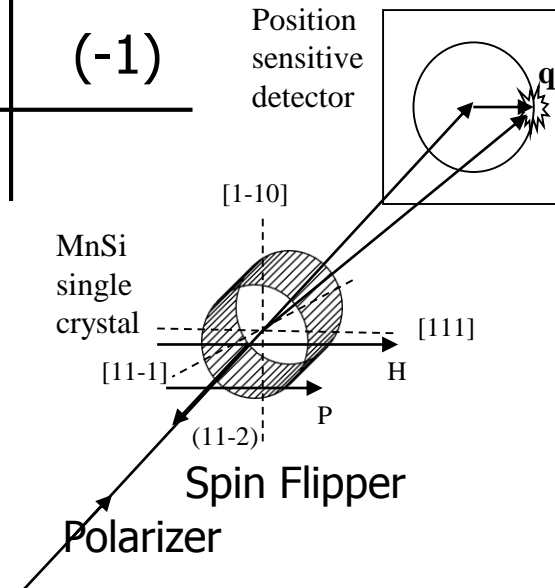
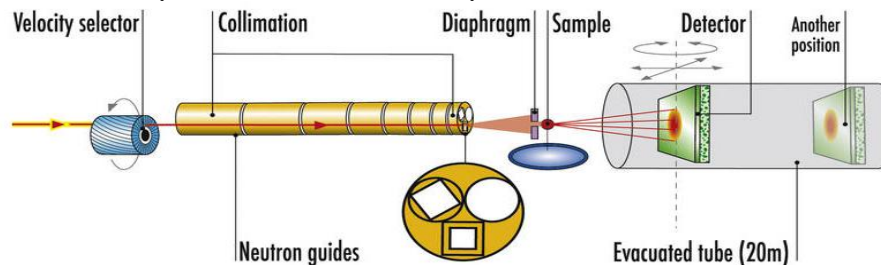
$$u_{\text{Fe}} = 0.135$$

$$u_{\text{Ge}} = 0.845$$



Γ_c	γ_m
(+1)	(+1)
(+1)	(-1)

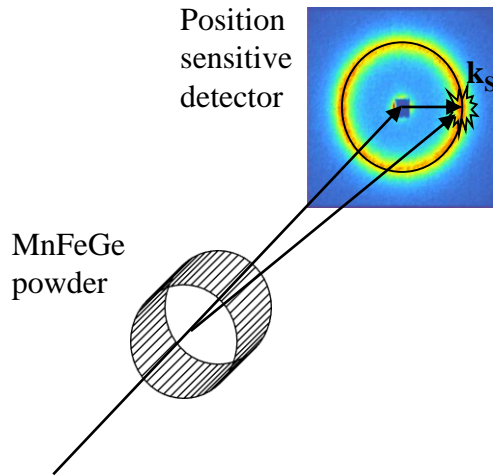
Experimental setup D22 (ILL)



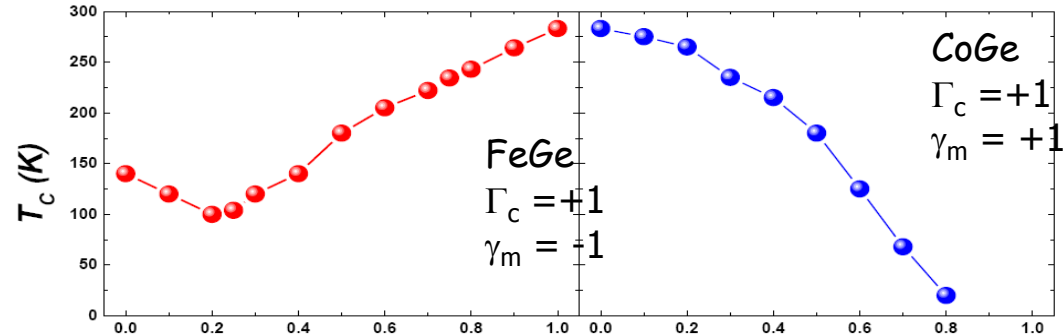


Flip of spin chirality in $Mn_{1-x}Fe_xGe$ and $Fe_{1-x}Co_xGe$

Small angle neutron powder diffraction was used to study magnetic structure $Mn_{1-x}Fe_xGe$ and $Fe_{1-x}Co_xGe$ compounds.

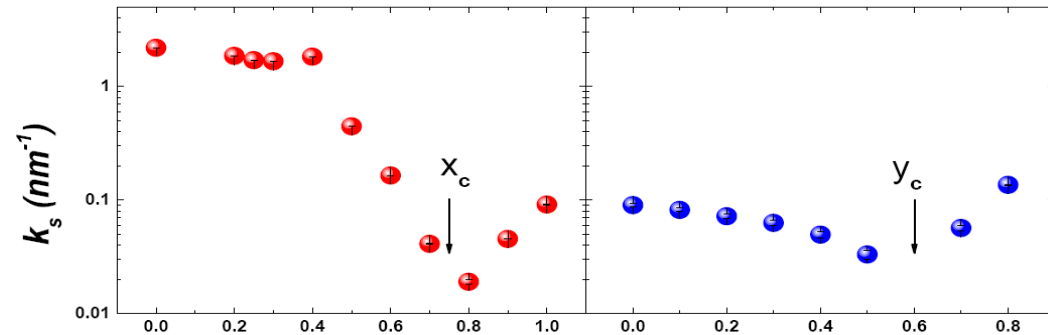


MnGe
 $\Gamma_c = +1$
 $\gamma_m = +1$



$Mn_{1-x}Fe_xGe$ [1]

$Fe_{1-y}Co_yGe$ [2]



[1] S. V. Grigoriev, N.M. Potapova, S.-A. Siegfried, et al, Phys. Rev. Lett. **110**, 207201 (2013)

[2] S. V. Grigoriev, S.-A. Siegfried, E. V. Altynbayev, et al, Physical Review B **90** pp. 174414 (2014)

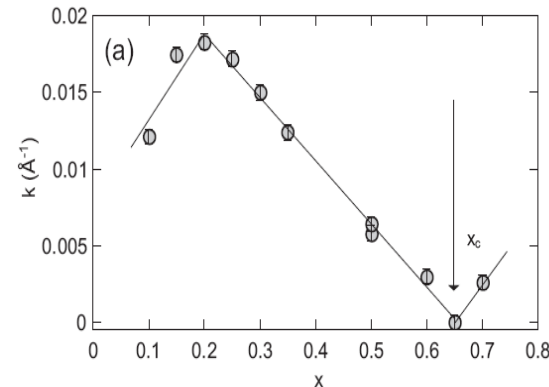
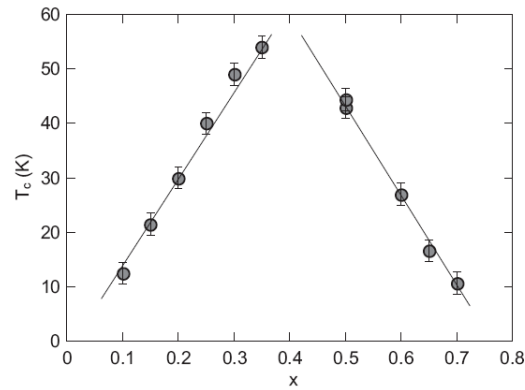
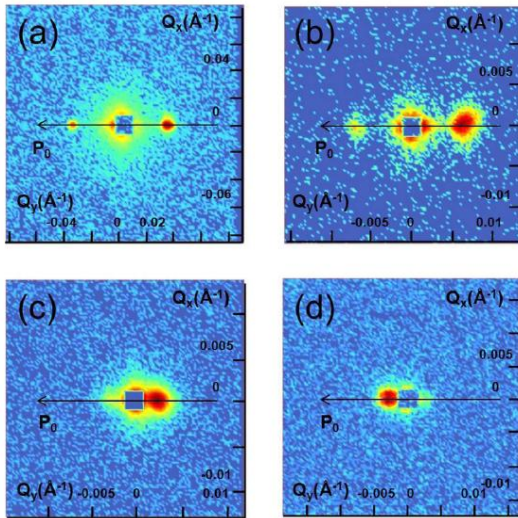
[3] S. V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, and S. V. Maleyev, Phys. Rev. B **91** 224429 (2015)

По результатам работы А.С. Суханов стал лауреатом премии им. И.В.Курчатова НИЦ «Курчатовский институт» за 2015 год среди студенческих работ.



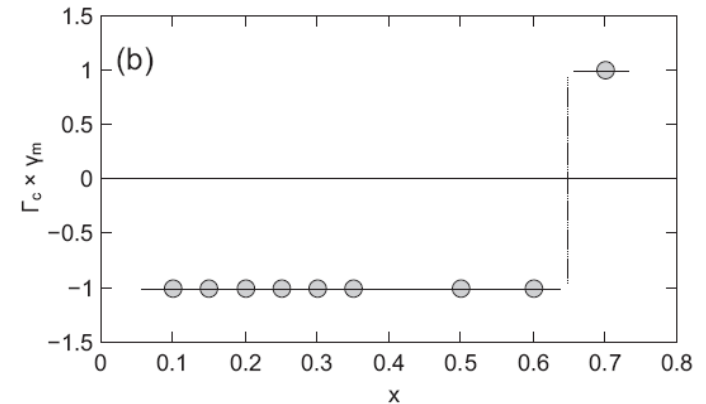
Flip of spin chirality in $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$

Small angle neutron single crystal diffraction was used to study magnetic structure $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ compounds.



FeSi
 $\Gamma_c = +1$
 $\gamma_m = -1$

CoSi
 $\Gamma_c = +1$
 $\gamma_m = +1$



[1] S.-A. Siegfried, E. V. Altyntbaev, N. M. Chubova, V. Dyadkin, D. Chernyshov, E. V. Moskvina, D. Menzel, A. Heinemann, A. Schreyer, and S. V. Grigoriev, Phys. Rev. B **91**, 184406 (2015).

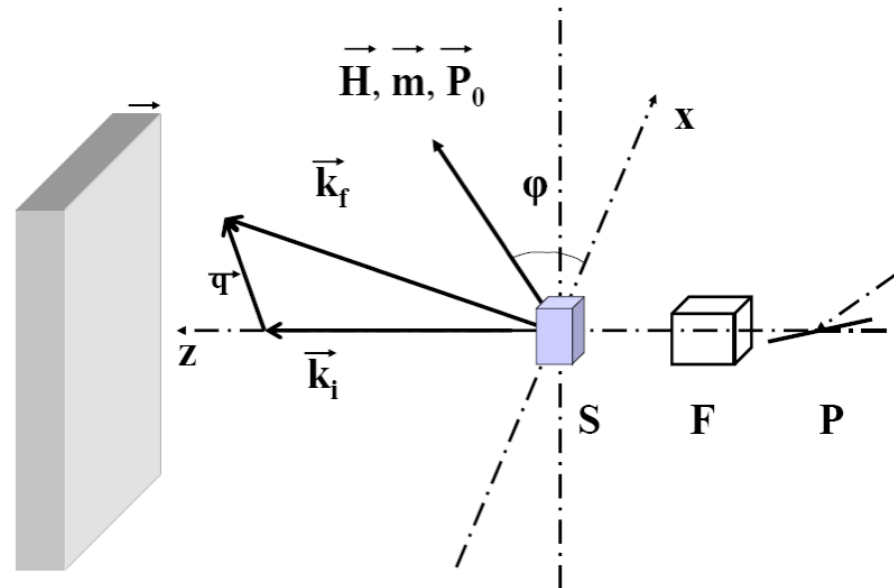
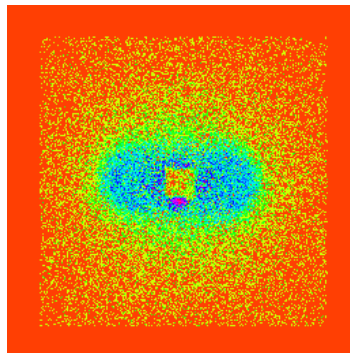
По результатам этих работ С.-А Зигфрид подготовил диссертацию на соискание ученой степени доктора философии.



Polarized Neutron School in Gatchina:

2. Small-angle scattering of polarized neutrons for magnetic nanostructures

Small-angle polarized neutron scattering as a method to study spin waves in ferromagnets



[1] A.I. Okorokov, et.al, JETP Lett. **43** (1986) 503.

[2] V. Deriglazov, A. Okorokov, V. Runov, B. Toperverg, et.al, Physica B **181–182** (1992) 262.

[3] B.P.Toperverg, V.V.Deriglazov, V.E.Mikhailova, Physica B **183** (1993) 326.

Kinematics of the neutron scattering on spin waves in helimagnets

Energy conservation law

$$(1) \quad \hbar\omega = E' - E = \left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)(k'^2 - k^2) = \varepsilon_q$$

$$\varepsilon_q = D(\mathbf{q} - \mathbf{k}_s)^2 + g\mu(H - H_{C2})$$

Impulse conservation law

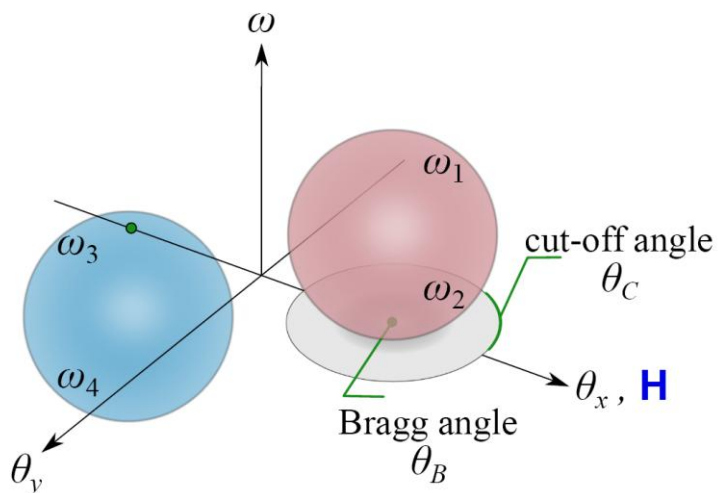
$$(2) \quad q^2 = k'^2 + k^2 - 2k'k \cos \theta$$

One receives the following solution:

$$\frac{\omega_{1,2}}{2E} = \theta_0 + \frac{k_s}{k_i} \sin \phi \mp \sqrt{C - \left(\theta^2 - \theta \cdot 2 \frac{k_s}{k_i} \cos \phi\right)}$$

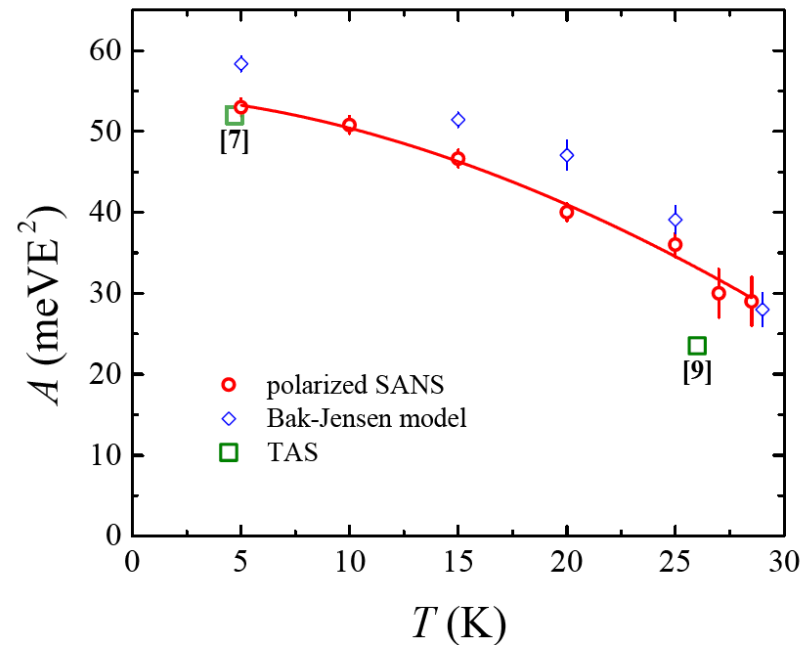
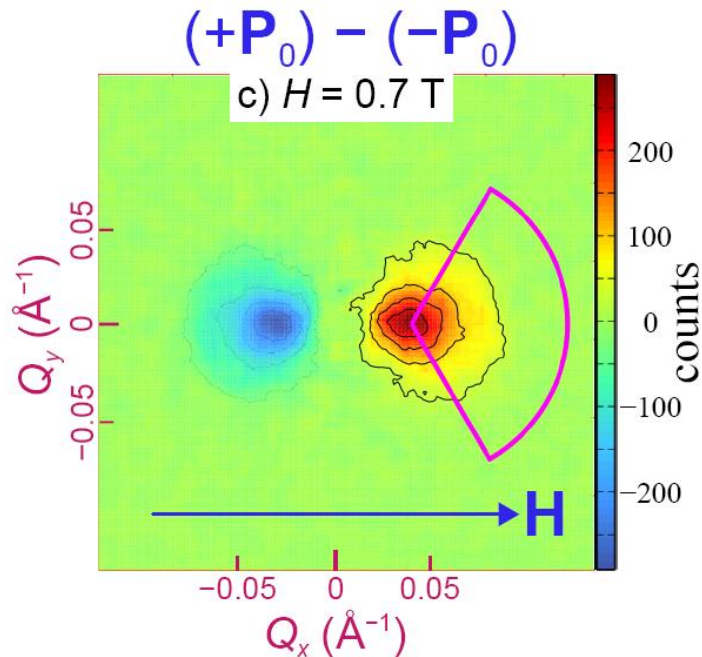
$$C = \theta_0^2 - \theta_0 \cdot \frac{H}{E} + \theta_0 \cdot 2 \frac{k_s}{k_i} \sin \phi + \left(\frac{k_s}{k_i}\right)^2 \sin^2 \phi$$

$$\theta_0 = \alpha^{-1} = \hbar^2 / 2Dm$$



Anti-symmetric part of neutron scattering in MnSi

Temperature dependence of spin wave stiffness



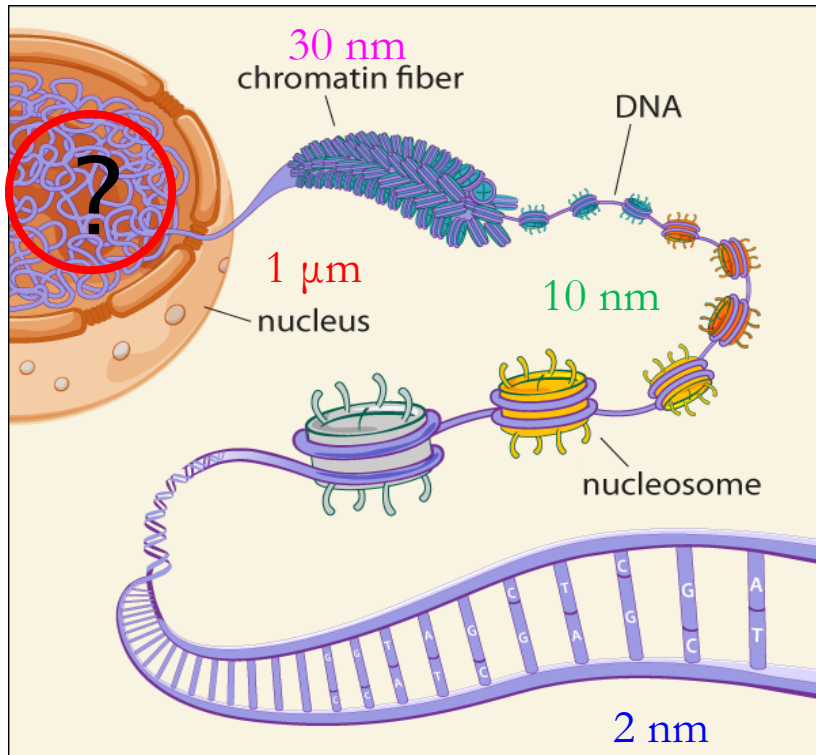
[1] S. V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, E. V. Altyntbaev, S.-A. Siegfried, A. Heinemann, P. Kizhe, S. V. Maleyev, Spin waves in full-polarized state of Dzyaloshinskii-Moriya helimagnets: small-angle neutron scattering study. Accepted to PRB(R) (2015).

Polarized Neutron School in Gatchina:

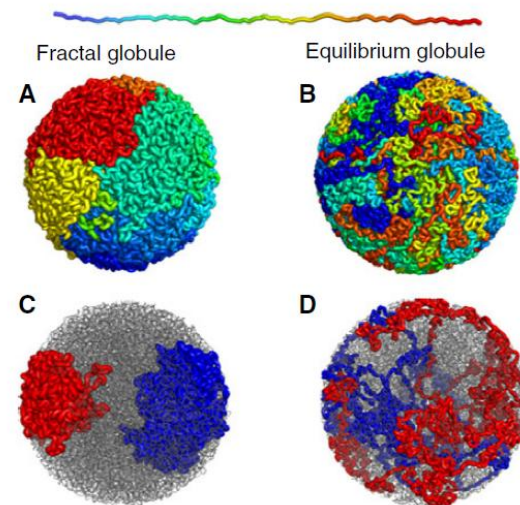
4. Small-angle scattering of polarized neutrons for biological objects

The fractal globule as a model of chromatin architecture in the cell

Leonid A. Mirny



The fractal globule is a compact polymer state that emerges during polymer condensation as a result of topological constraints which prevent one region of the chain from passing across another one.



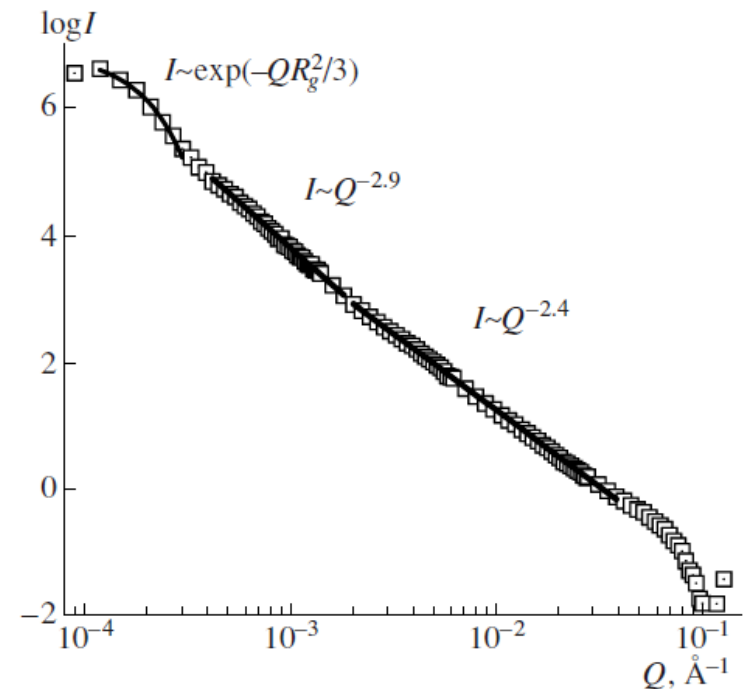


Structural Hierarchy of Chromatin in Chicken Erythrocyte Nuclei Based on Small-Angle Neutron Scattering: Fractal Nature of the Large-Scale Chromatin Organization

D. V. Lebedev^{a, b}, M. V. Filatov^a, A. I. Kuklin^c, A. Kh. Islamov^c, J. Stellbrink^d,
R. A. Pantina^a, Yu. Yu. Denisov^a, B. P. Toperverg^a, and V. V. Isaev-Ivanov^{a, b}

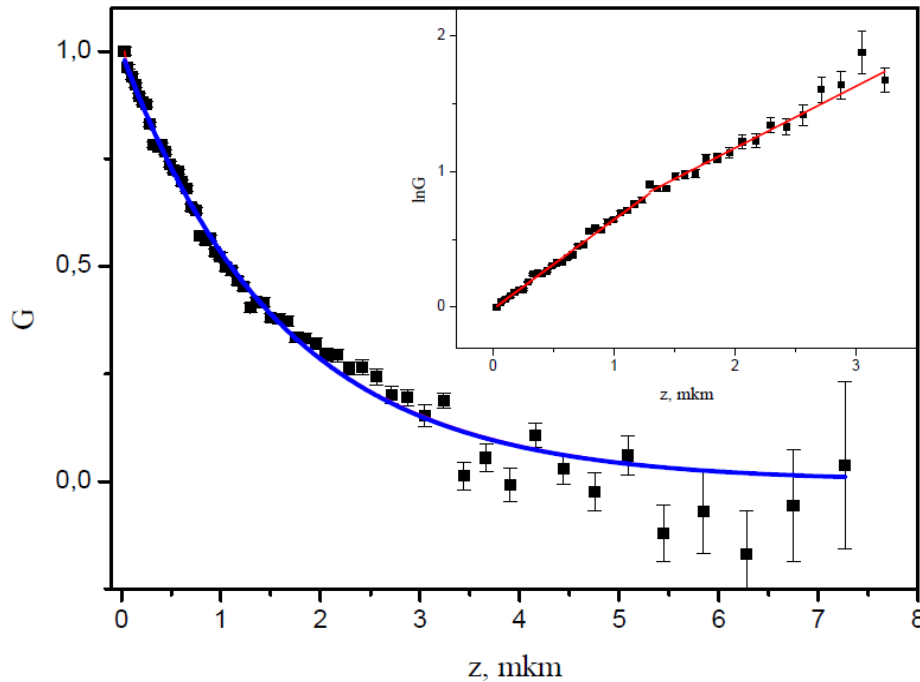
Chromatin exhibits properties that are characteristic of a mass fractal with fractal dimension $D_m=2.4$ on the scale between 15–20 nm and 400 nm.

The DNA organization was **biphasic**, with the fractal dimension slightly higher than 2 on the scales smaller than 300 nm and approaching 3 on the larger scales.





SESANS measurements form chicken erythrocyte nuclei



(SESANS, TU,
Delft, Netherlands)

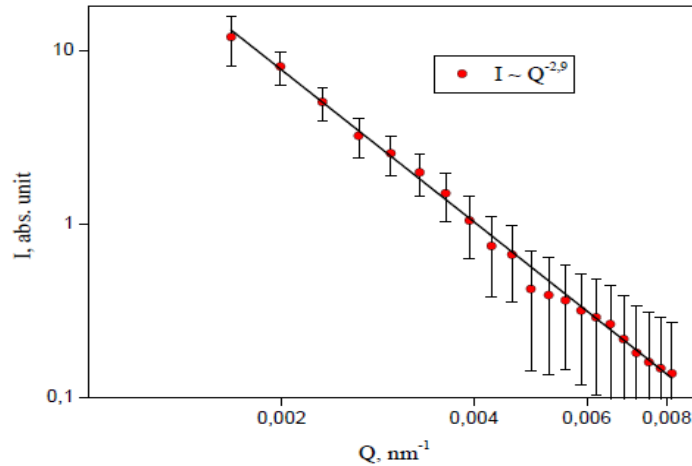
Solid curve is the result of
approximation of experimental
data by an exponential function

$$\exp(-z/\xi) , \xi = 1.6, \chi^2 = 4$$

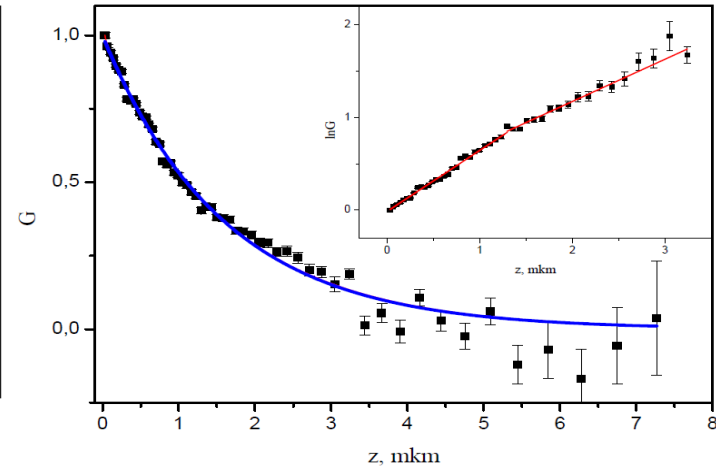
SESANS function from isolated chicken
erythrocyte nuclei



SANS



SESANS



Small-angle neutron scattering from isolated chicken erythrocyte nuclei

$$I(Q) = \frac{1}{(1 + (Q\xi)^2)^{3/2}}$$

SESANS function from isolated chicken erythrocyte nuclei

$$G(z) = \exp(-z/\xi)$$

The power-law character of the neutron scattering intensity versus the scattering vector with parameter $D = 3$ or close to corresponds to the exponential law of the SESANS function.

$$\gamma(r) = \frac{1}{\pi} K_0(r/\xi)$$

Correlation function

If $r/\xi < 1$
then $\gamma(r) \sim \ln(\xi/r)$



What means $\gamma(r) \sim \ln(\xi/r)$?

correlation function

$$\gamma(r) \sim \ln(\xi/r)$$

scaling law

$$\gamma(r/a) = \gamma(r) + \ln(a)$$

$\ln(a)$ - additive constant

It has an unusual scaling law. The correlation function increases with an **additive** rather than **multiplicative** constant, upon reducing the ruler length by a fixed rescaling factor. This leads to a logarithmic law instead of the usual power law for fractals.

По результатам работы Е.Г. Яшина стала лауреатом премии им. И.В.Курчатова НИЦ «Курчатовский институт» за 2015 год среди студенческих работ.



NATIONAL RESEARCH CENTRE
«KURCHATOV INSTITUTE»



PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE

Russia, 188300, Leningrad District , Gatchina, Orlova Roscha

Спасибо за внимание!