

Ф.Б. Мушенок

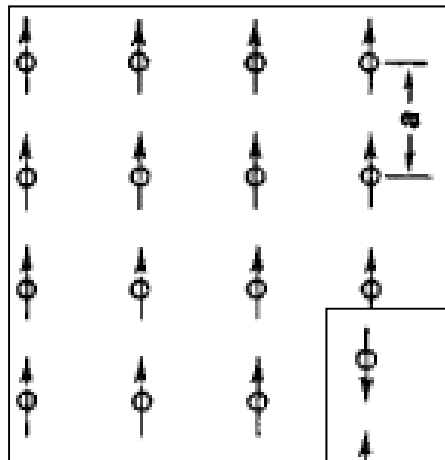
**Ферромагнитный резонанс в
гелимагнетике $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$**

Институт Проблем Химической Физики
г. Черноголовка

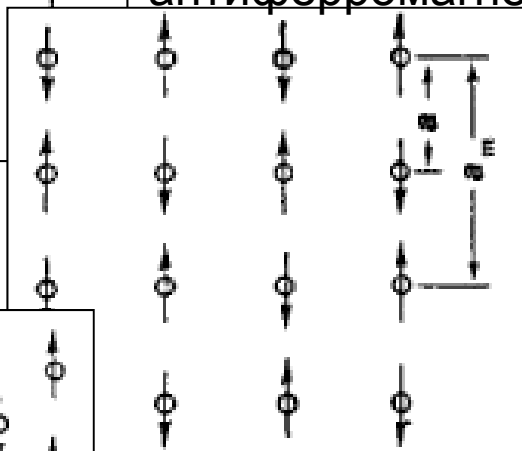
Типы магнитного упорядочения

Соразмерные магнитные структуры

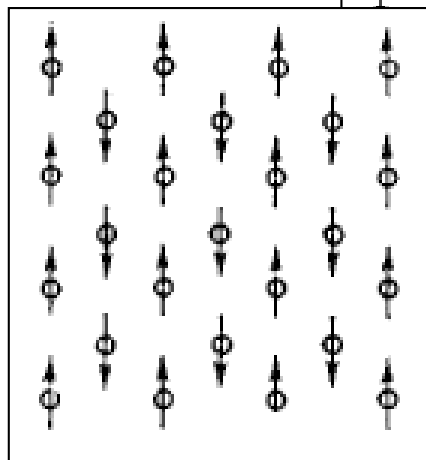
ферромагнетик



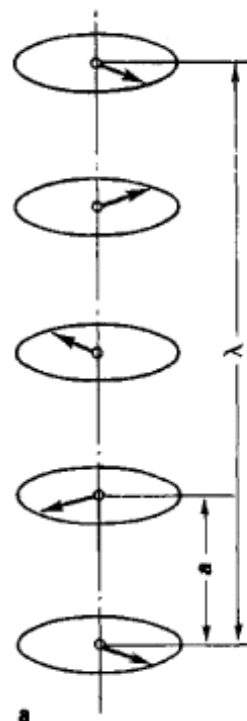
антиферромагнетик



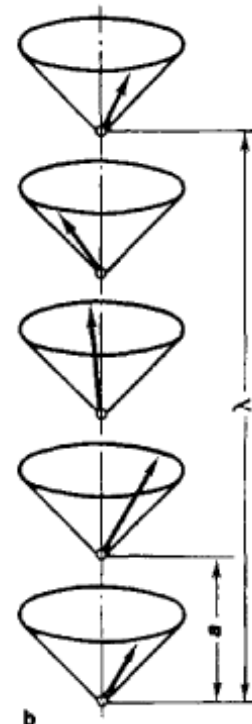
ферримагнетик



Несоразмерные магнитные структуры



простая спираль
(геликоид)

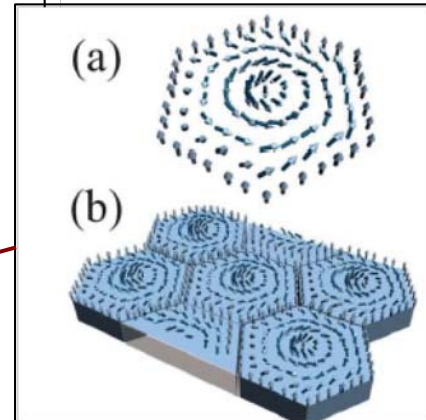
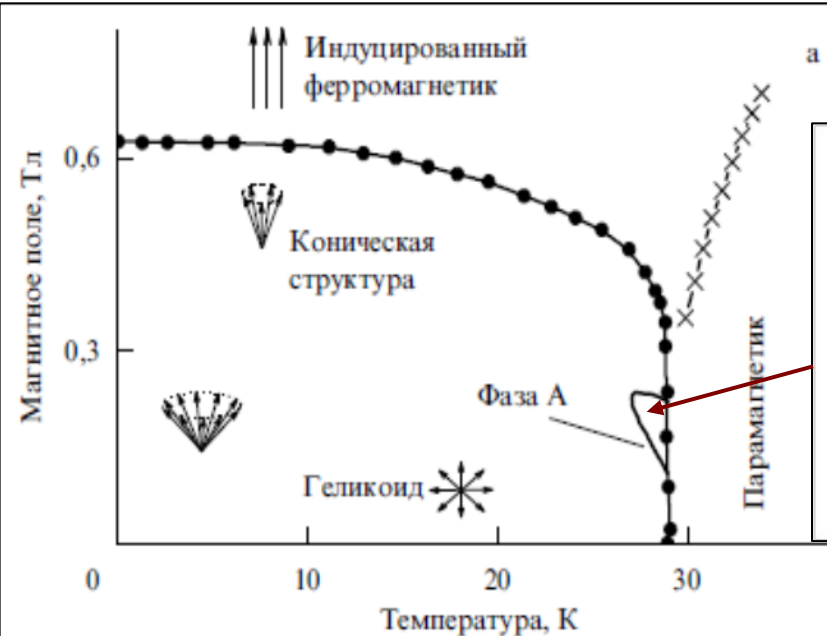
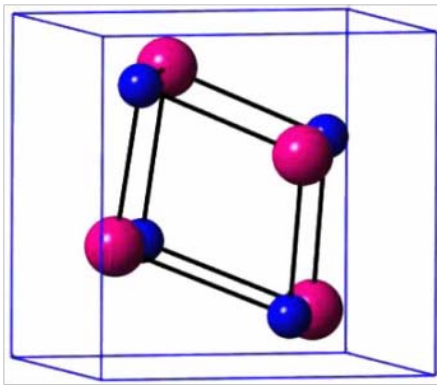


коническая
структура

Несоразмерные магнитные структуры

Кубические гелимагнетики:

MnSi, Fe_{1-x}Co_xSi, FeGe



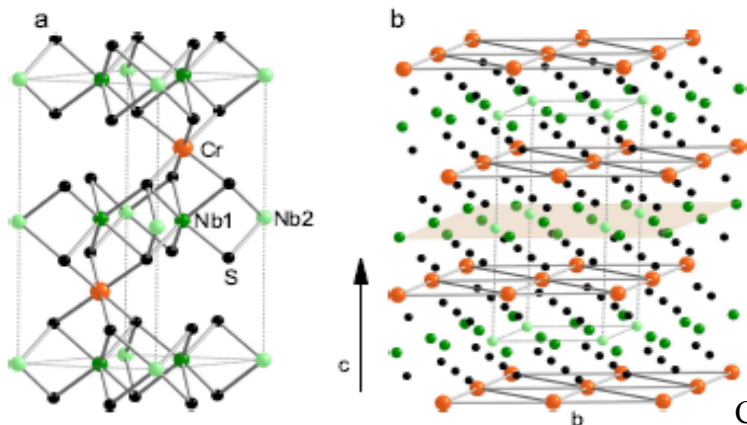
U. Rossler, A. Leonov, A. Bogdanov, J. Phys: Conf. Ser. **303** 012105 (2011)

Магнитная фазовая диаграмма MnSi

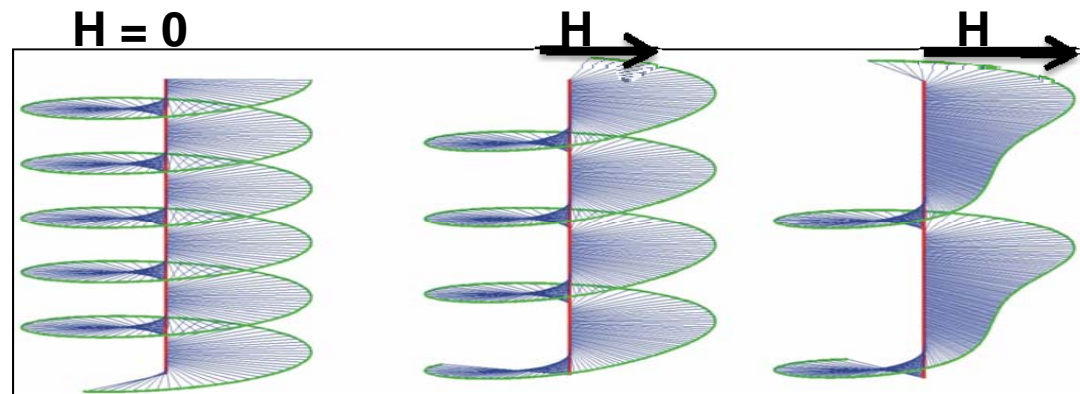
С.М. Стишов, А.Е Петрова, УФН, **181**, 1157 (2011).

- скирмионная решетка;
- топологический эффект Холла;
- квантовый фазовый переход под действием давления.

Кристаллическая и магнитная структуры $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$



Кристаллическая структура $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$
N. J. Ghimire et al, arXiv: 1209.3883v1



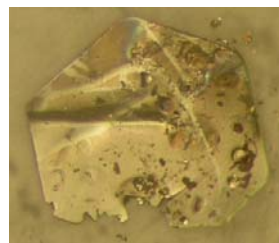
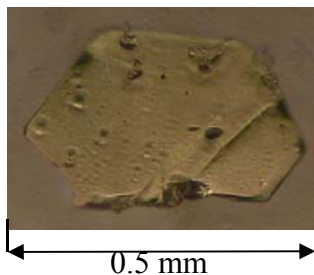
Схематическое изображение распределения намагниченности в геликоидальной магнитной структуре при различных значениях внешнего магнитного поля.

$$T_c \sim 130 \text{ K}, L_0 = 480 \text{ \AA}, H_c \sim 1,3 \text{ kOe}$$

Получение монокристаллов $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$



Химический транспорт в атмосфере йода, градиент температур $T = 950^\circ - 800^\circ \text{ C}$



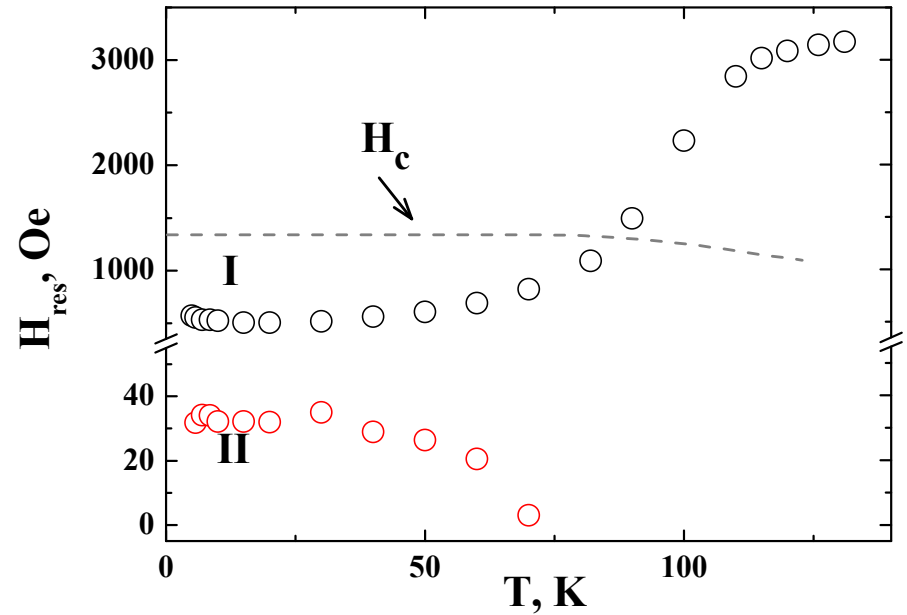
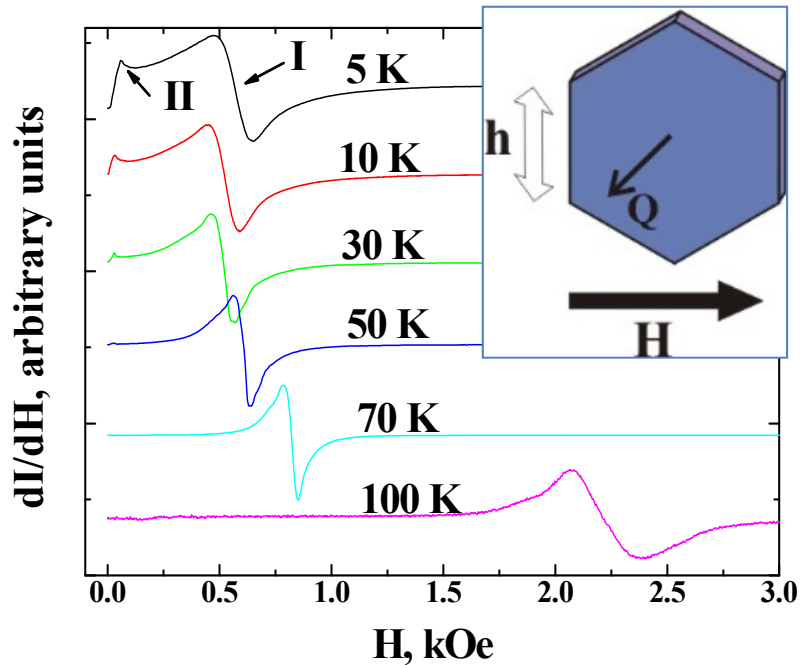
XRD

$$\begin{aligned} a &= b = 5.73 \text{ \AA} \\ c &= 12.05 \text{ \AA} \\ \alpha &= \beta = 90^\circ \\ \gamma &= 120^\circ \end{aligned}$$

EDX

$$\begin{aligned} \text{Cr: } &0.270 \quad 0.007 \\ \text{Nb: } &1.061 \quad 0.005 \\ \text{S: } &2.002 \quad 0.009 \end{aligned}$$

Ферромагнитный резонанс



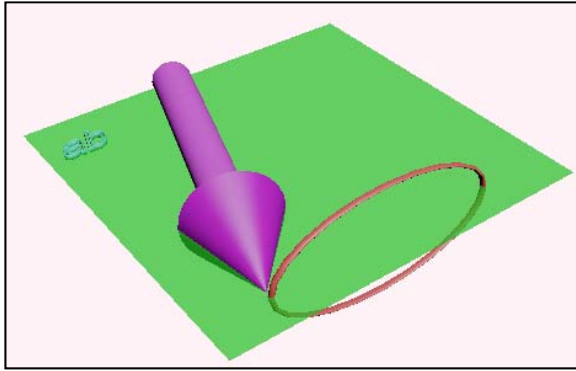
Спектры ферромагнитного резонанса монокристалла $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ при различных температурах, $H \perp c$, $h \parallel c$ ($\parallel Q$).

Температурные зависимости резонансных полей линий I и II, $H \perp c$, $h \parallel c$ ($\parallel Q$). Пунктирной линией показано примерное значение критического поля H_c .

Спектрометр Bruker EMX, X диапазон (9,5 GHz)
 $T = 5 - 300$ K, $H = 0 - 2$ T

Ферромагнитный резонанс

однородная ($q = 0$) мода



$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{\text{res}} \left(H_{\text{res}} + \frac{2K_1}{M_S} + 4\pi M_S \right)$$

B.R. Cooper, R.J. Elliot Phys. Rev., **131**, 1043 (1963)

ω/γ – гиромангнитное отношение;

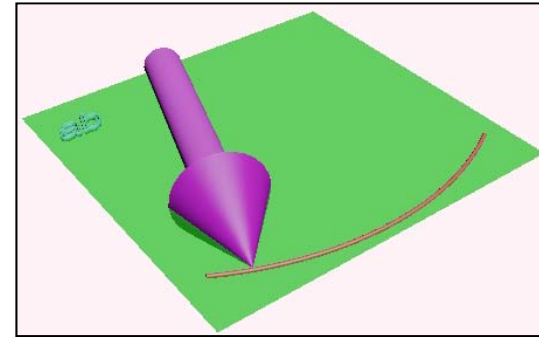
H_{res} – резонансное поле;

K_1 – константа одноосной

магнитокристаллической анизотропии;

M_S – намагниченность насыщения.

голдстоуновская ($q = \pm Q$) мода

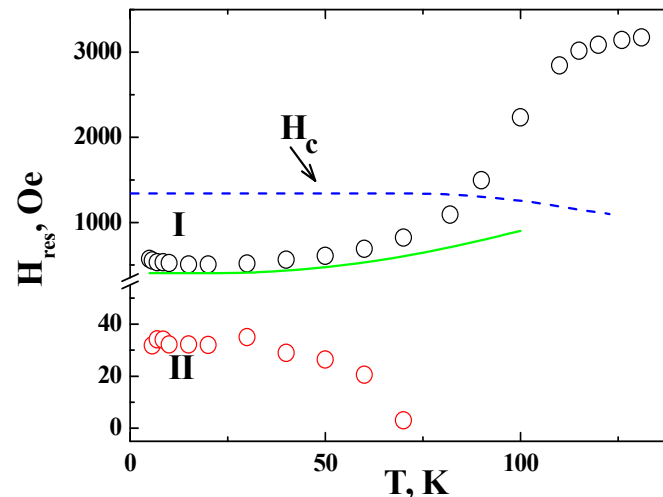
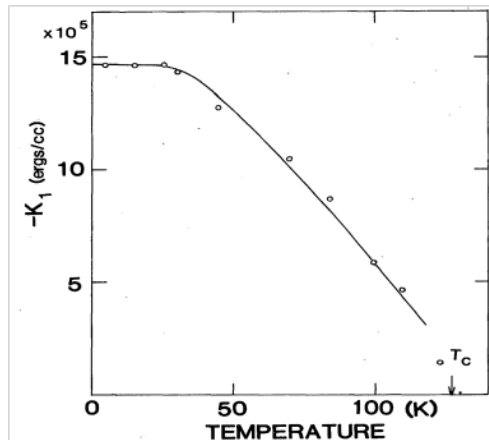


Конечное значение энергии $\hbar\omega_{\pm Q}$ индуцировано магнитокристаллической анизотропией в базальной плоскости

$$\hbar\omega_{\pm Q} \sim \sqrt{K_6}$$

K_6 – константа анизотропии в базальной плоскости.

T. Nagamiya, "Solid State Physics" **20**, 30 (1967), U. Smith, S. Haraldson, J. Mag. Res., **16**, 390 (1974).



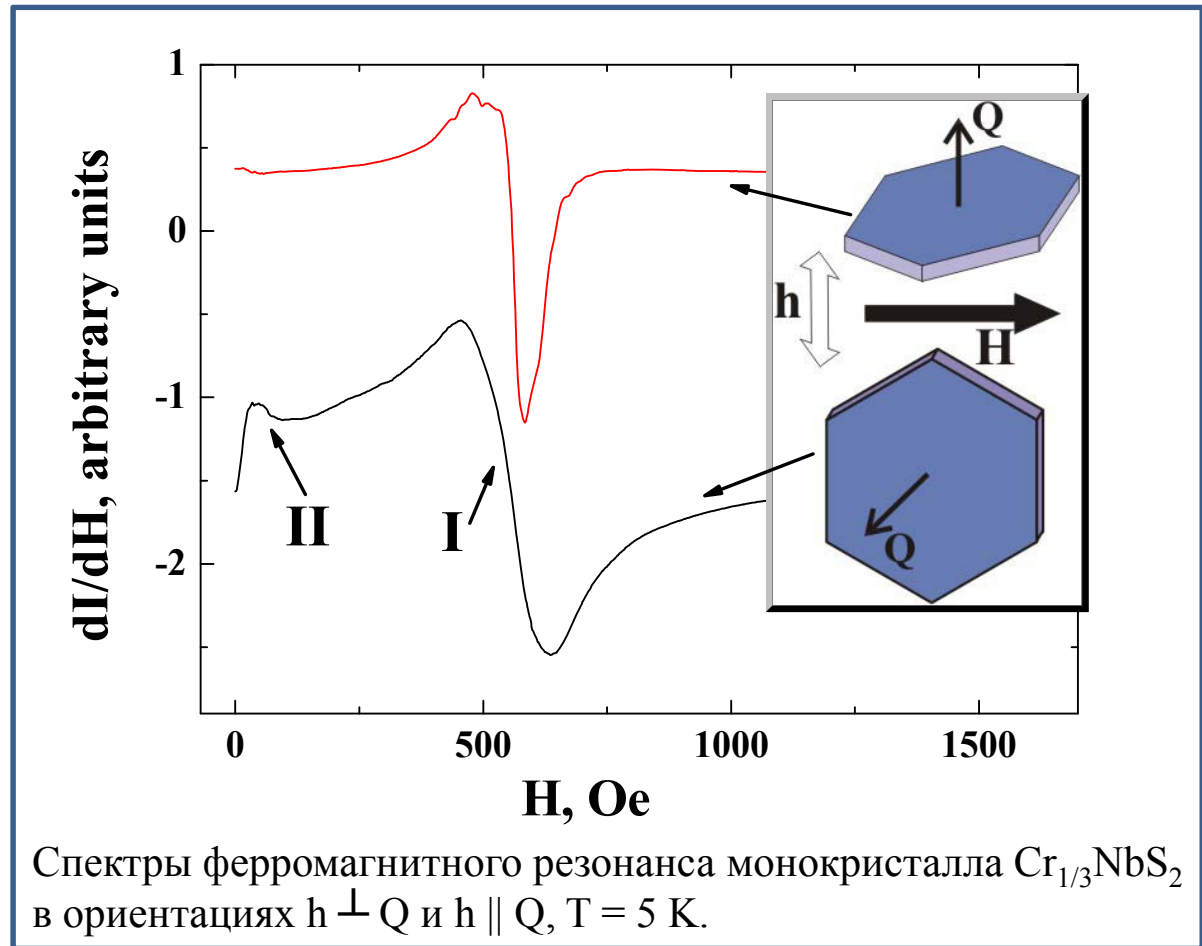
Линия I соответствует однородной моде ($q = 0$) спиновой прецессии в гелимагнитной фазе.

Линия II соответствует голдстоуновской ($q = \pm Q$) моде.

Ферромагнитный резонанс

Мода $q = \pm Q$
возбуждается ТОЛЬКО в
ориентации $h \perp Q$.

Т. Nagamiya, "Solid State
Physics" **20**, 30, (1967).



Резонансное поле линии I не зависит от взаимной ориентации векторов h и Q .
Линия II наблюдается только в ориентации $h \perp Q$ и не наблюдается в ориентации $h \parallel Q$.

Линия II соответствует моде $q = \pm Q$.

Выводы

В геликоидальной фазе $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ обнаружены две линии ФМР с различной температурной зависимостью резонансного поля.

Линия I соответствует однородному резонансу на геликоидальной структуре (волновой вектор $q = 0$). Её резонансное поле определяется одноосной анизотропией.

Линия II соответствует возбуждению голдстоуновской моды с волновым вектором $q = \pm Q$. Конечное значение энергии моды $q = \pm Q$ обусловлено магнитокристаллической анизотропией в базальной плоскости.

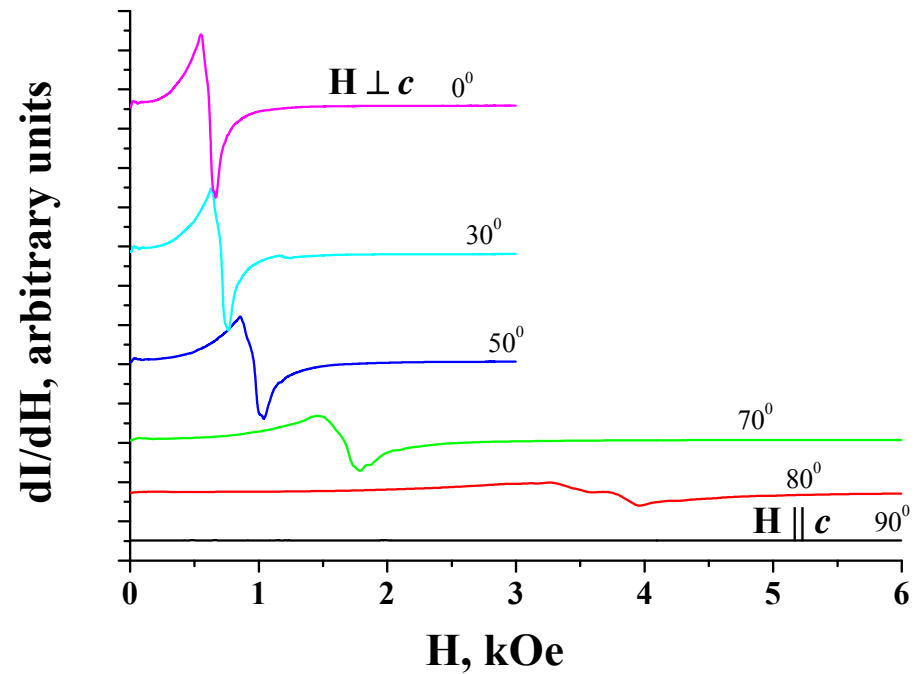
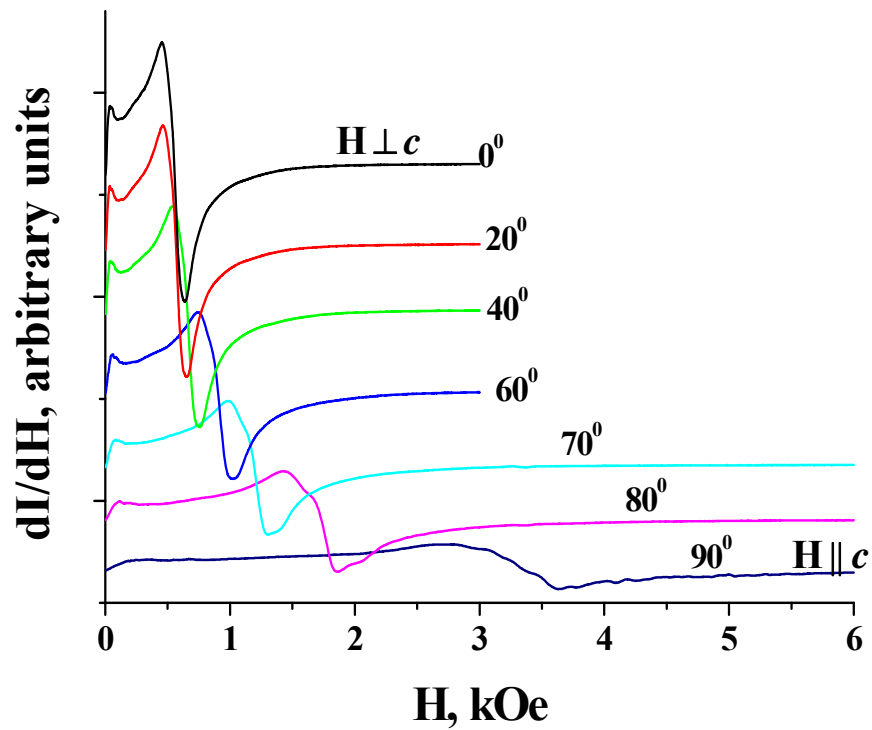
Экспериментально продемонстрировано, что возбуждение моды $q = \pm Q$ происходит только в ориентации $h \perp Q$.

Спасибо за внимание!

а также спасибо

к.ф.-м.н. Шилову Г.В., к.ф.-м.н. Ованесяну Н.С. (*ИПХФ РАН*)

проф. Farle M., Rod I. (*Duisburg-Essen University, Germany*)



Угловая зависимость спектров ФМР при $T = 10$ К и $T = 50$ К.

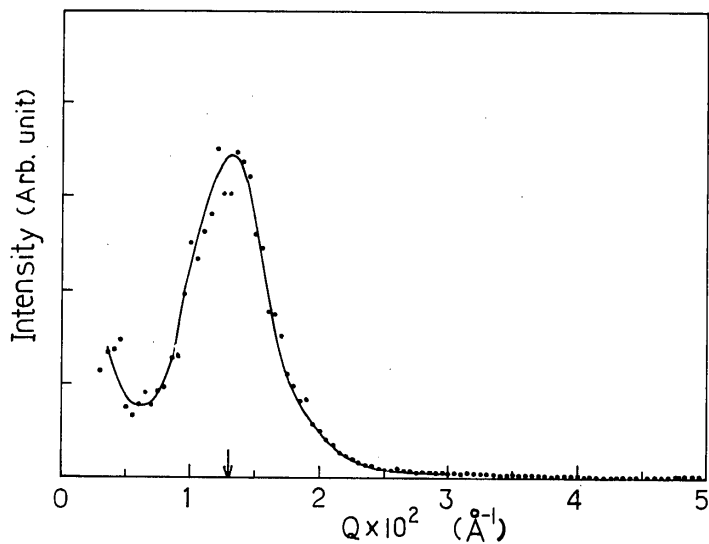
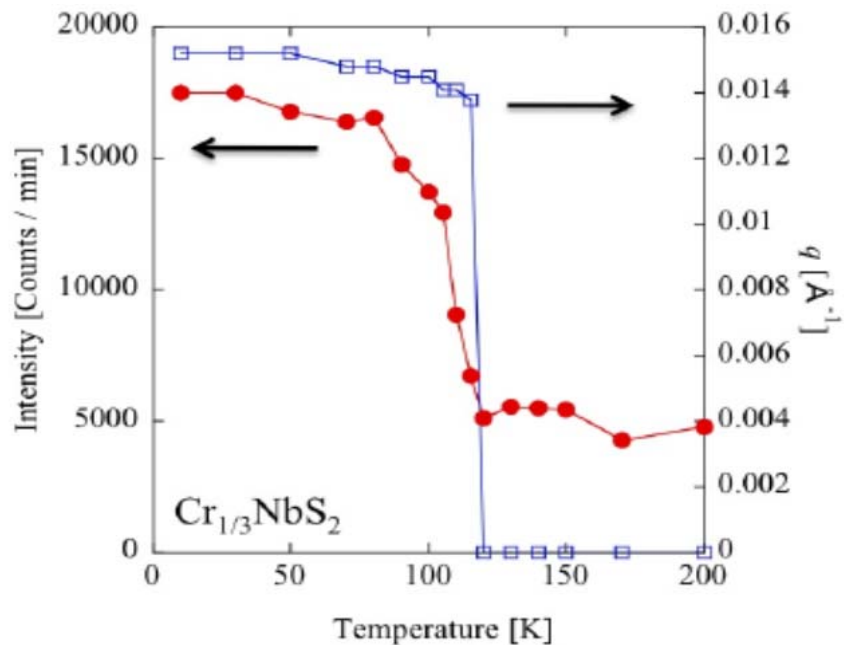


Fig. 8. One dimensional display of small angle scattering at 13 K obtained by summing all data with the same Q around $(0, 0, 0)$. The data at room temperature was subtracted as the background.

Journal of the Physical Society of Japan
 Vol. 52, No. 4, April, 1983, pp. 1394–1401



Положение и интенсивность магнитных пиков

Activity Report on Neutron Scattering Research: Experimental Reports 16 (2009) Rep. # 814

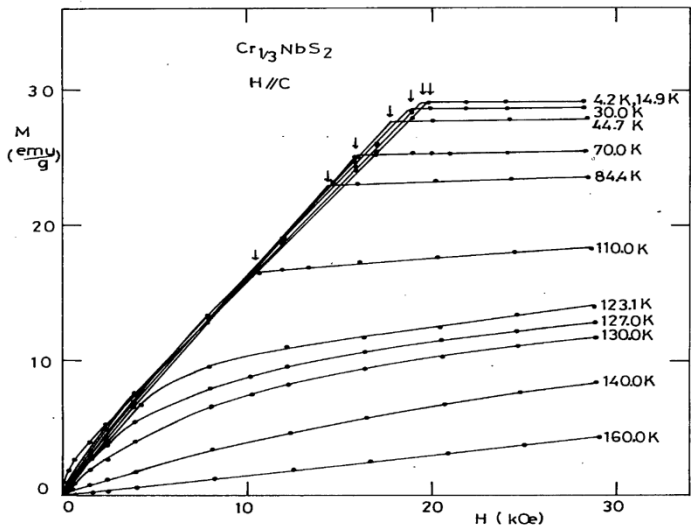


Fig. 1. Magnetization curves along c -axis ($H//c$) at various temperatures. The arrow denotes the anisotropy field H_K .

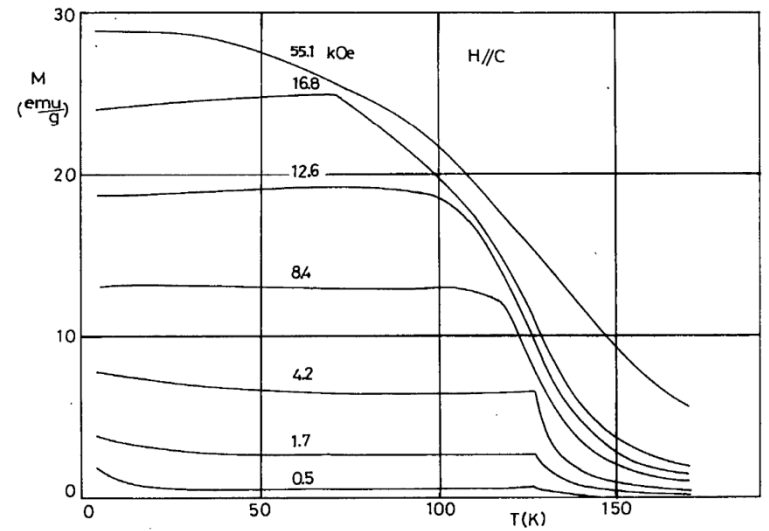
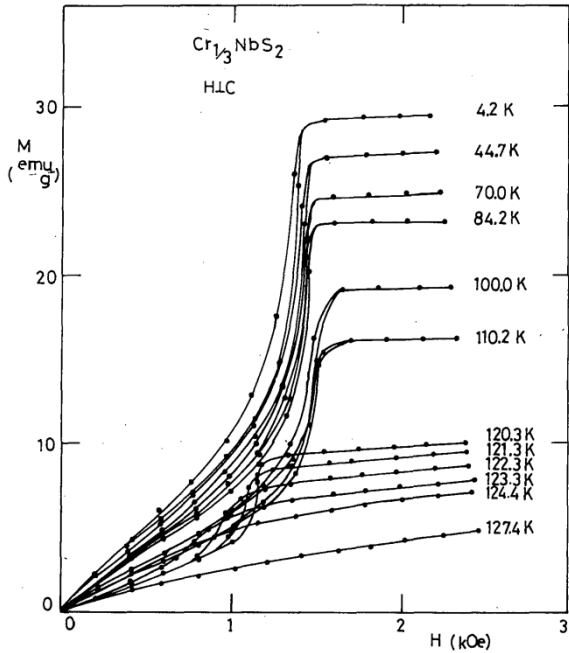
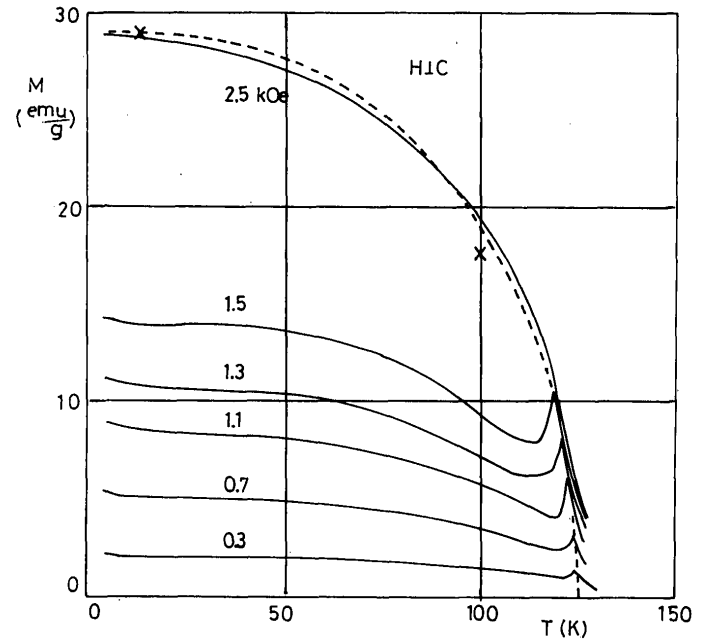


Fig. 2. Temperature variations of the magnetization along c -axis ($H//c$) at various fields.



В.Г. Барьяхтар, А.И. Жуков, Д.А. Яблонский, ФТТ, 21, 776 (1979).

$$E(k) \sim \sqrt{\alpha k^2 (\alpha k^2 + \beta + \alpha Q_0^2)}$$

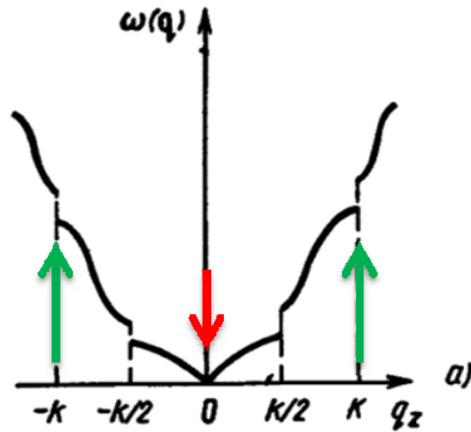
α – постоянная неоднородного обмена;

$\beta > 0$ - постоянная анизотропии;

Q_0 - волновой вектор магнитной структуры.

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma\mu_0(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) + \frac{\lambda\gamma\mu_0}{M_S}\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}})$$

Ферромагнитный резонанс

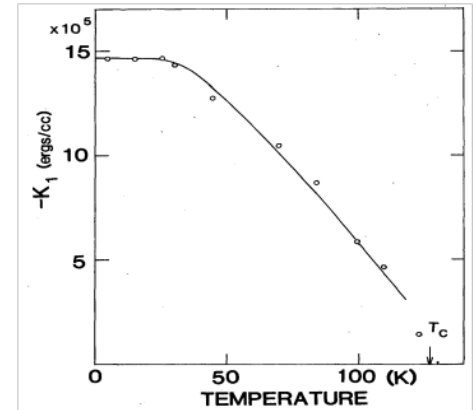


однородная ($q = 0$) мода

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{\text{res}} \left(H_{\text{res}} + \frac{2K_1}{M_s} + 4\pi M_s \right)$$

B.R. Cooper, R.J. Elliot Phys. Rev., **131**, 1043 (1963)

ω/γ – гиромагнитное отношение;
 H_{res} – резонансное поле;
 K_1 – константа одноосной магнитокристаллической анизотропии;
 M_s – намагниченность насыщения.



Температурная зависимость одноосной анизотропии для $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$
 T. Miyadai, K. Kikuchi, H. Kondo et al., JPSJ **52**, 1394 (1983).

Спектр спиновых волн солитонной решетки. Волновой вектор отсчитывается относительно вектора модуляции магнитной структуры.

Ю.А. Изюмов «Дифракция нейтронов на длиннопериодических структурах»

голдстоуновская ($q = Q$) мода

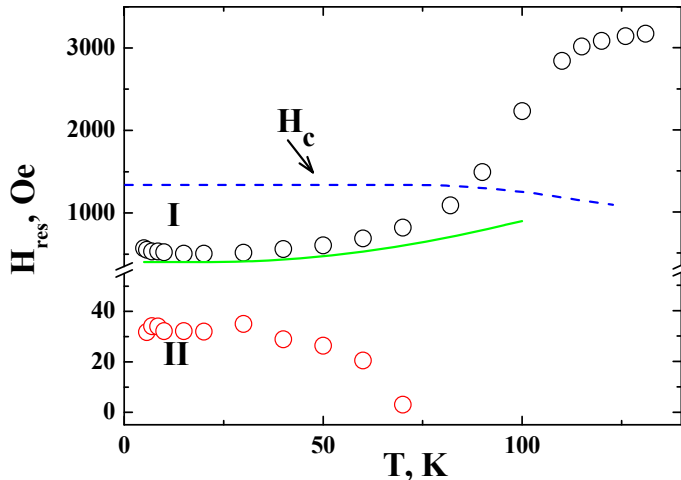
Конечное значение энергии $\hbar\omega_Q$ может быть индуцировано магнитокристаллической анизотропией в базальной плоскости

$$\hbar\omega_{\pm Q} \sim \sqrt{K_6}$$

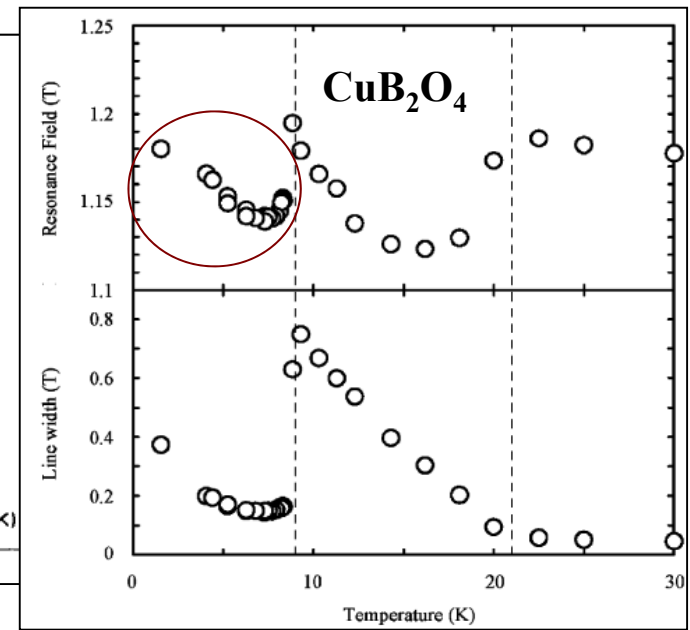
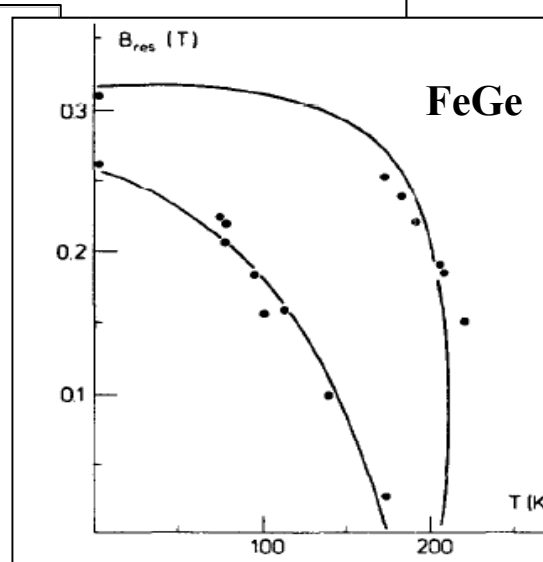
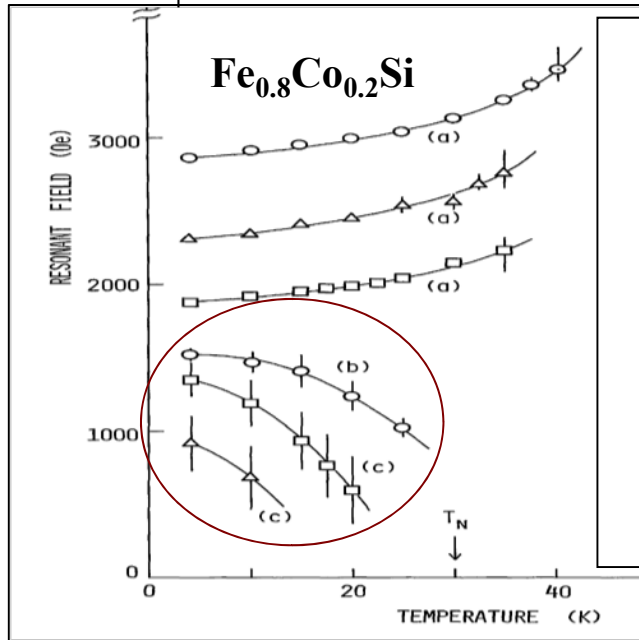
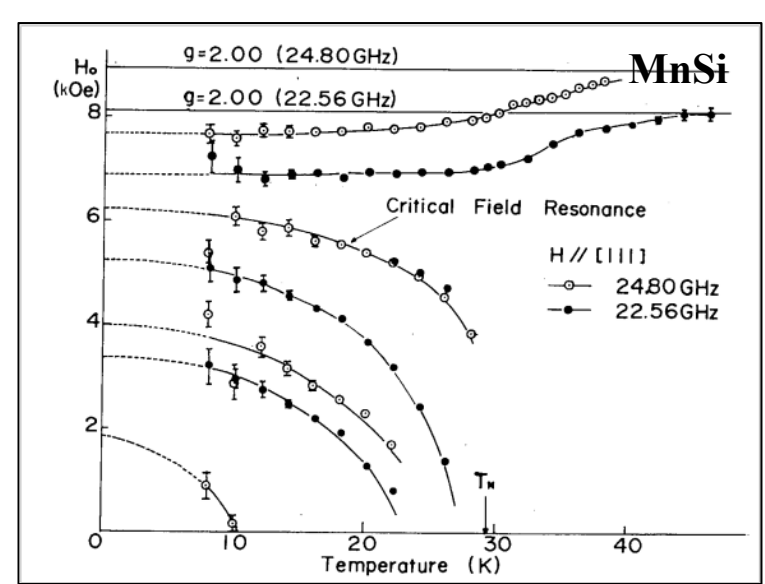
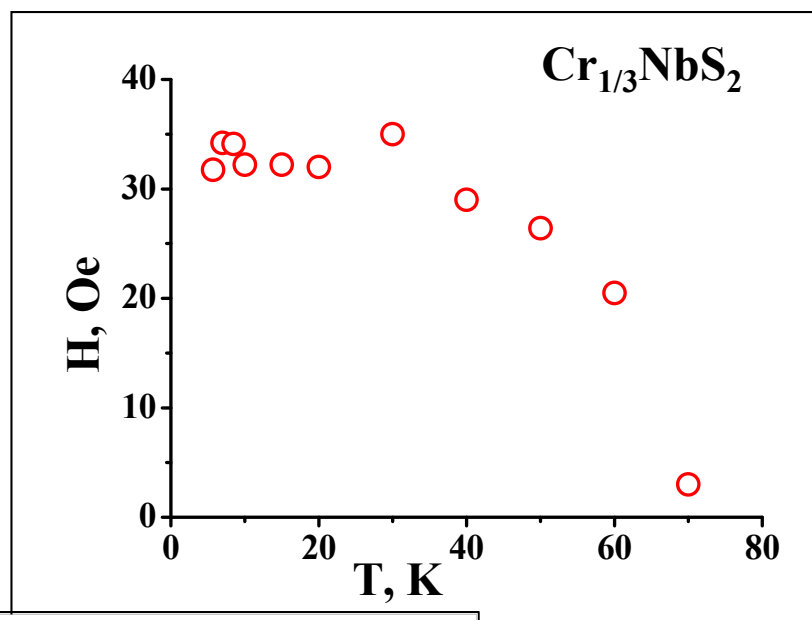
K_6 – константа анизотропии в базальной плоскости.

T. Nagamiya, "Solid State Physics" **20**, 30 (1967), U. Smith, S. Haraldson, Journal of Magnetic Resonance, **16**, 390 (1974).

Линия I соответствует однородной моде ($q = 0$) спиновой прецессии в гелимагнитной фазе. Линия II соответствует голдстоуновской ($q = \pm Q$) моде.



Температурная зависимость резонансных полей линии I и II. Критическое поле показано пунктирной линией. Расчетное значение однородной моды показано сплошной линией.



Температурные зависимости резонансных полей линий ФМР в геликоидальных магнетиках Cr_{1/3}NbS₂, MnSi, Fe_{0.8}Co_{0.2}Si, FeGe, CuB₂O₄.

M. Date, K. Okuda, K. Kadowaki, Journal of the Physical Society of Japan, **42**, 1555 (1977); U. Smith, S. Haraldson, Journal of Magnetic Resonance, **16**, 390 (1974); H. Watanabe, Journal of Phys. Soc. Jap., **58**, 1035 (1989).