

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

в XY-антиферромагнетике
на пирохлорной решетке $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

Яфарова А.Ф.

базовая кафедра ФНТ (ИФП РАН)

научный руководитель: **Сосин С.С.**

рецензент: **Готовко С.К.**



содержание

- общие слова
- что известно про $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$
- создание и тестирование вращателя
- результаты $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

ВВЕДЕНИЕ

$$\hat{H}_{ex} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \hat{S}_i \hat{S}_j$$

$J_{\text{АФМ}} < 0$

$$S_{\Delta}^2 = 0$$

$J_{\text{ФМ}} > 0$

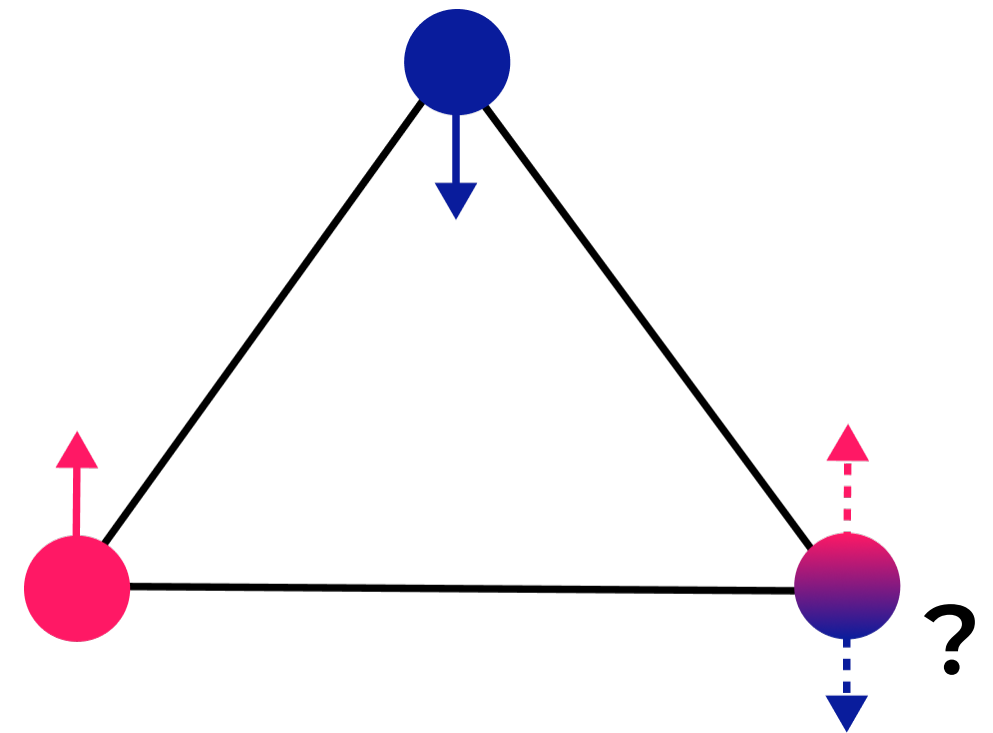
$$S_{\Delta}^2 \rightarrow \text{max}$$

фрустрация на триъгълник

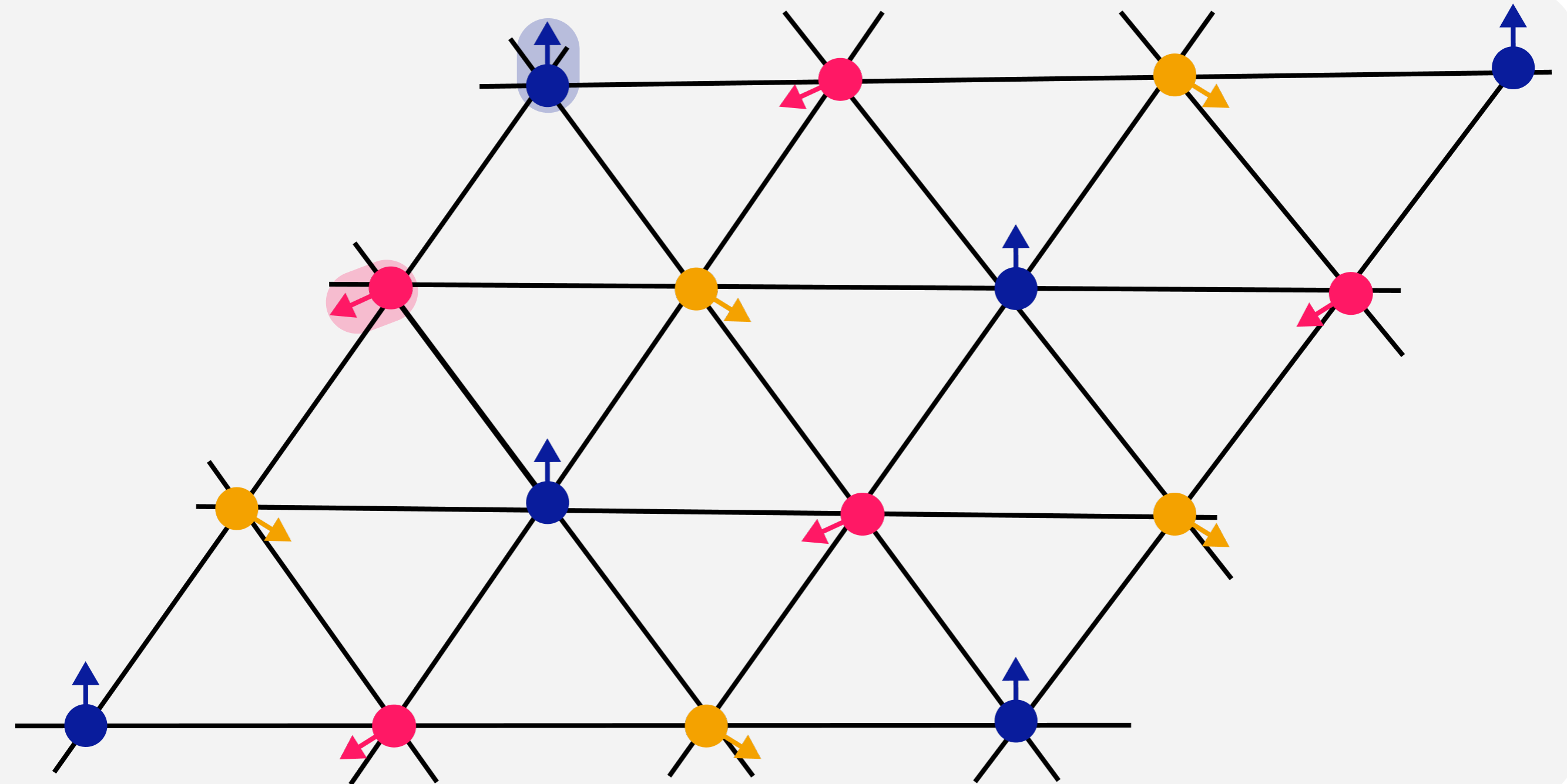
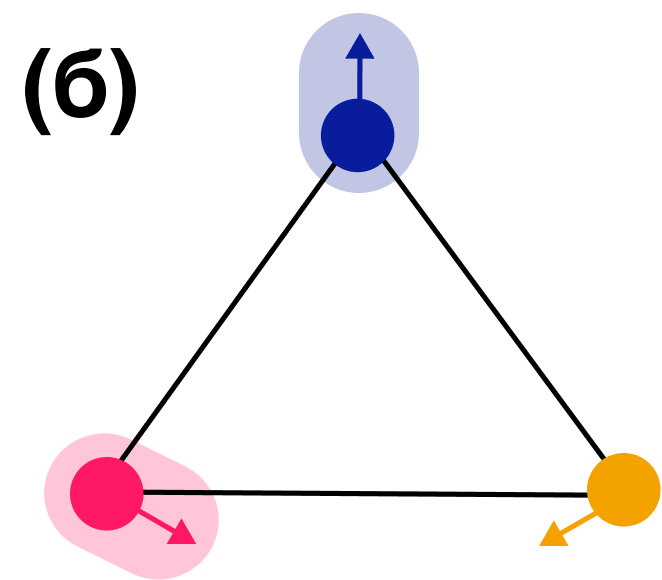
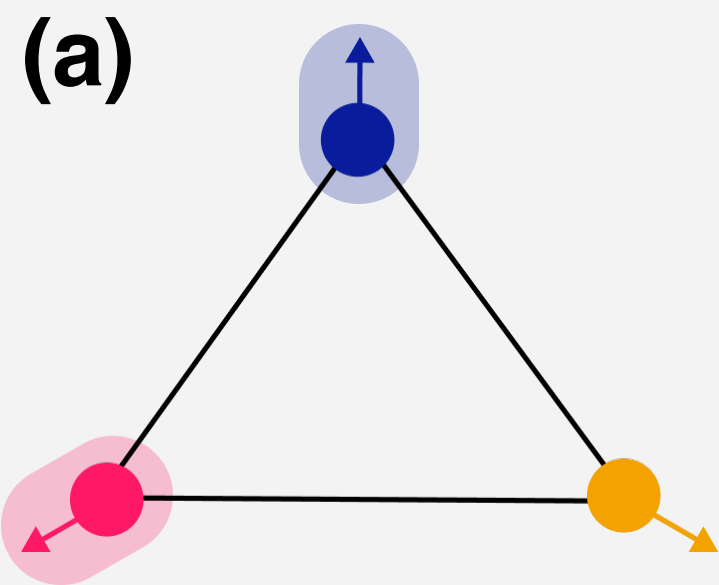
$$\hat{H}_{ex} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \hat{S}_i \hat{S}_j$$

$$J_{\text{АФМ}} < 0$$

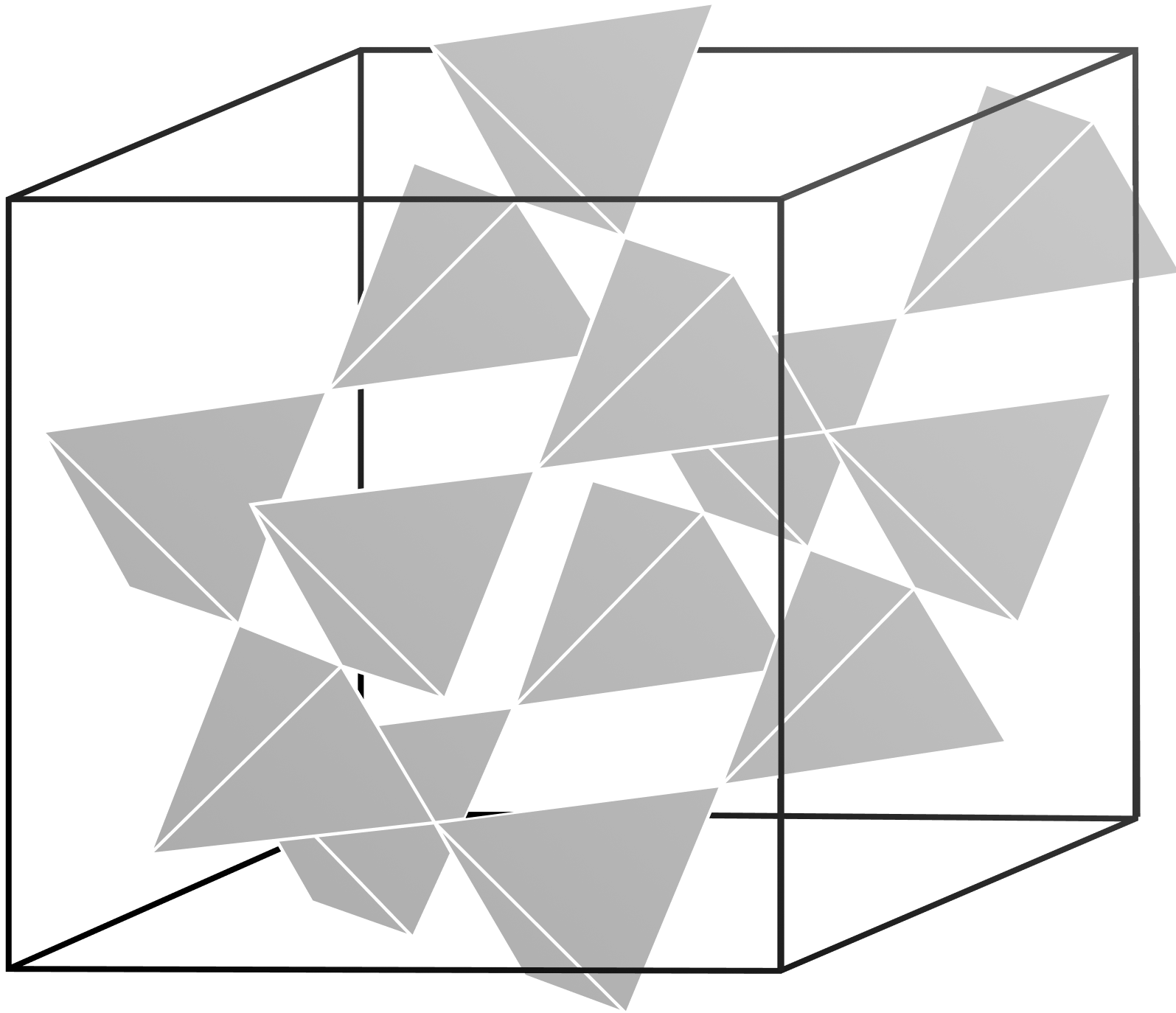
$$S_{\Delta}^2 = 0$$



фрустрация на треугольной решетке

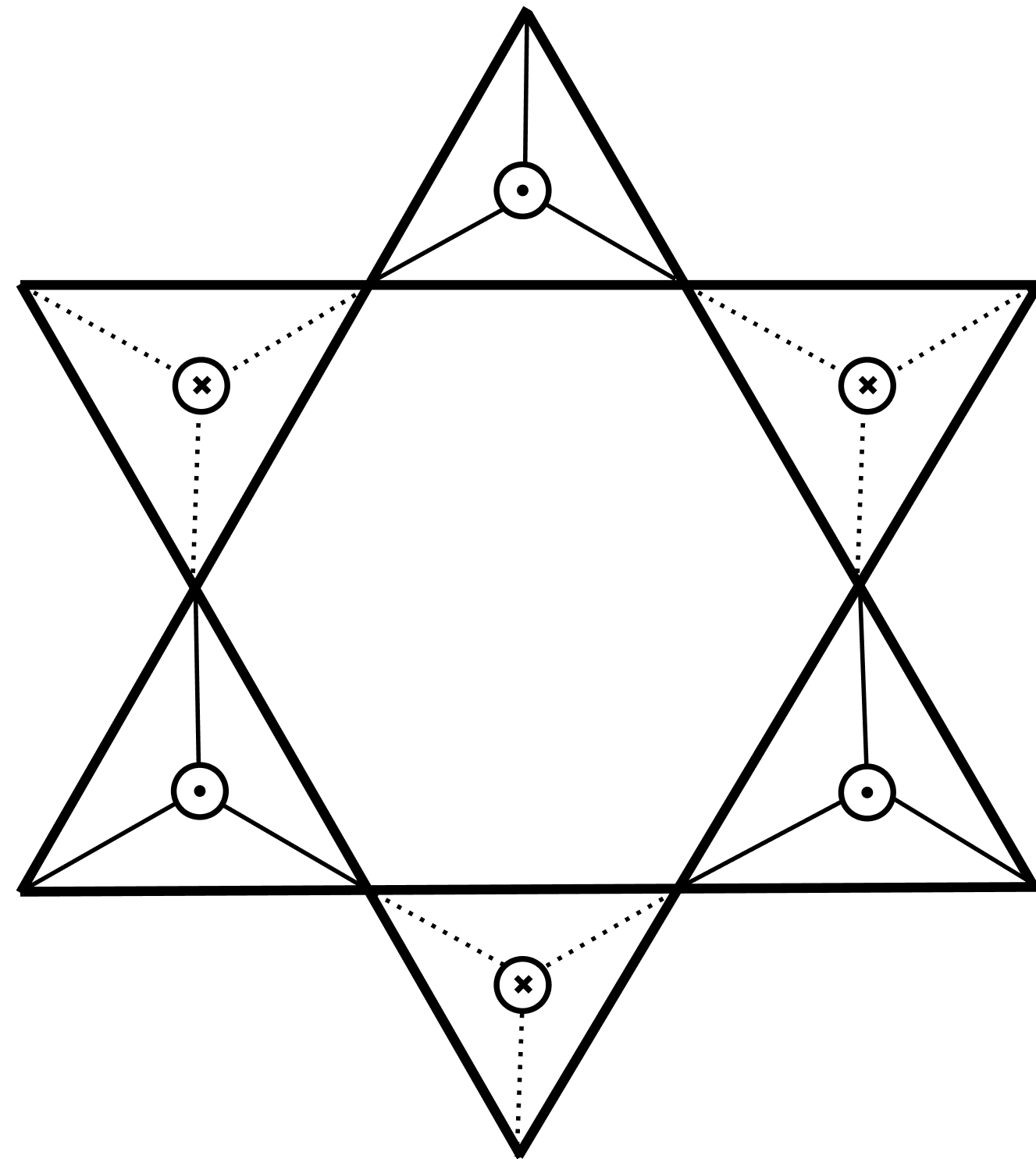
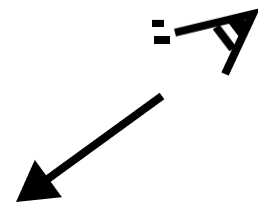
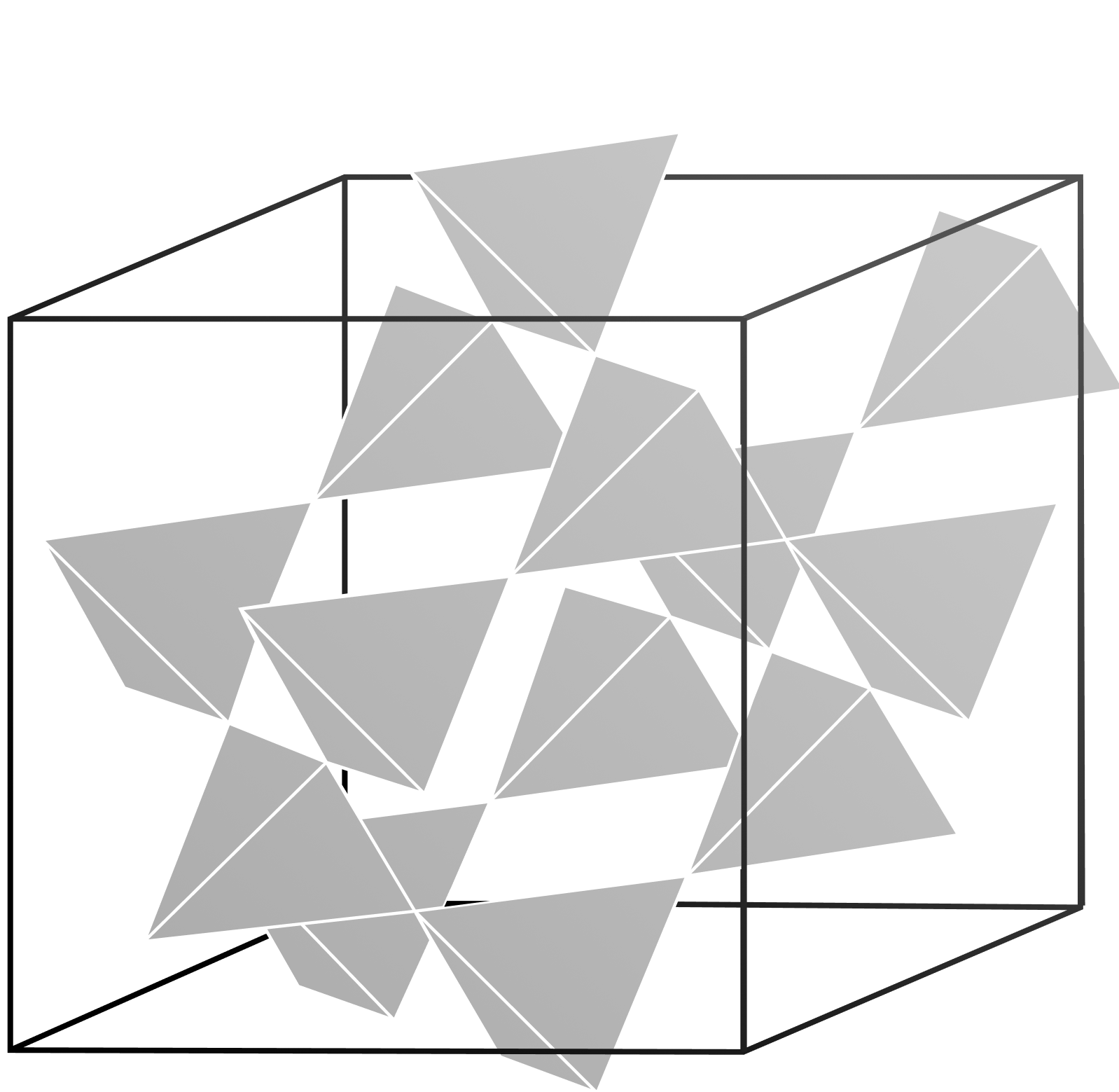


пироклорная решетка

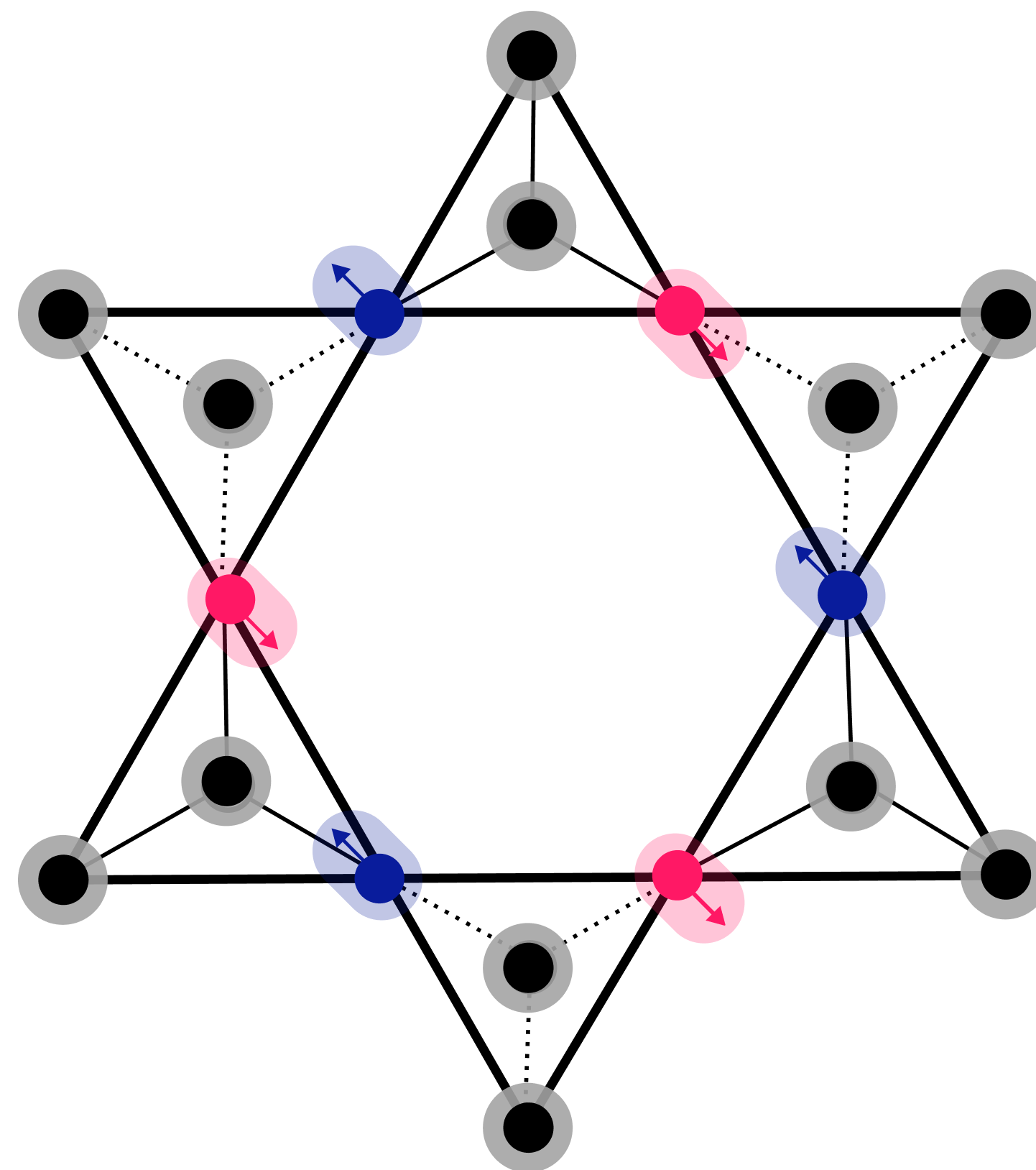
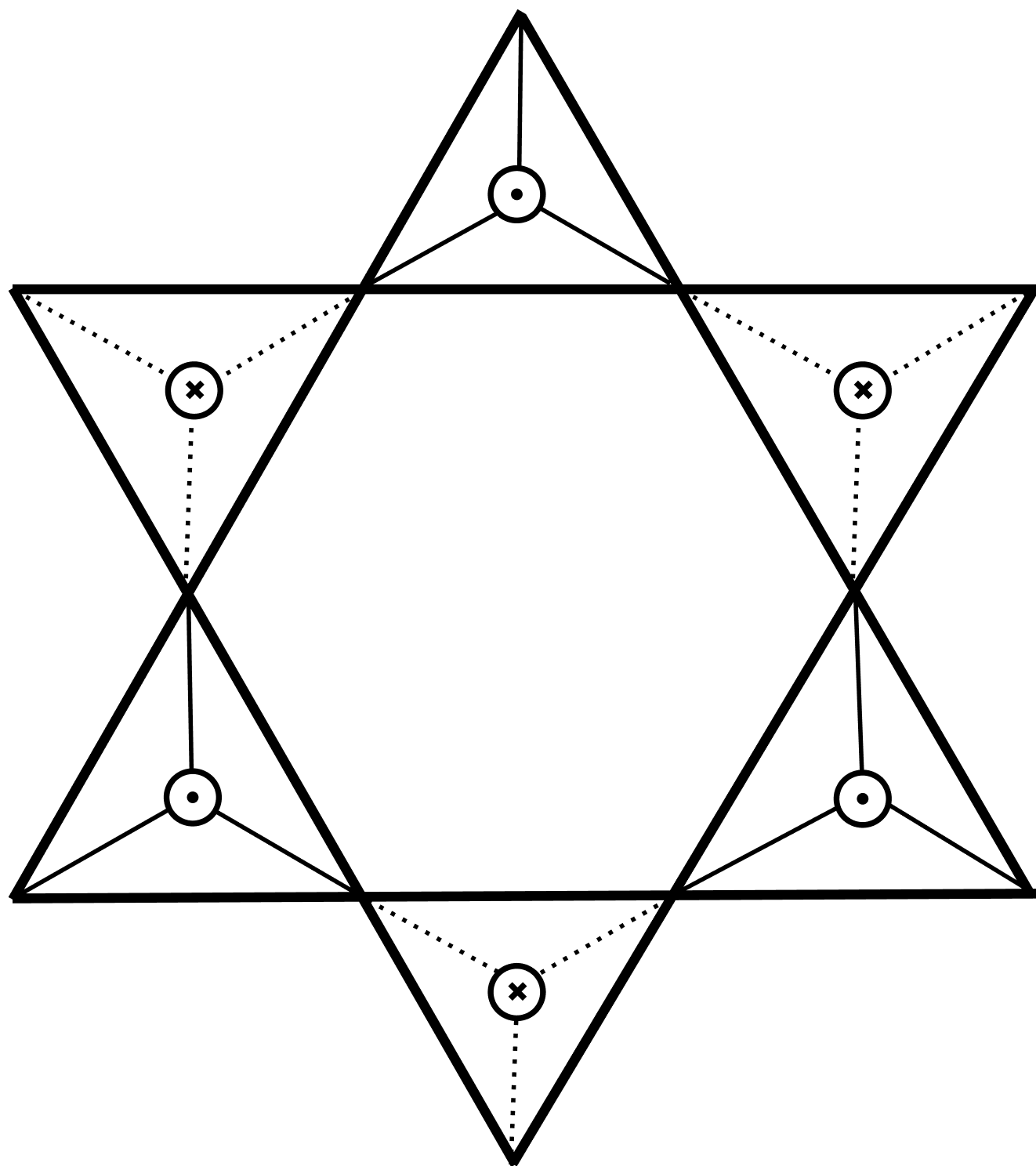


- массив тетраэдров, соединенных по узлам
- кубическая симметрия

пирохлорная решетка



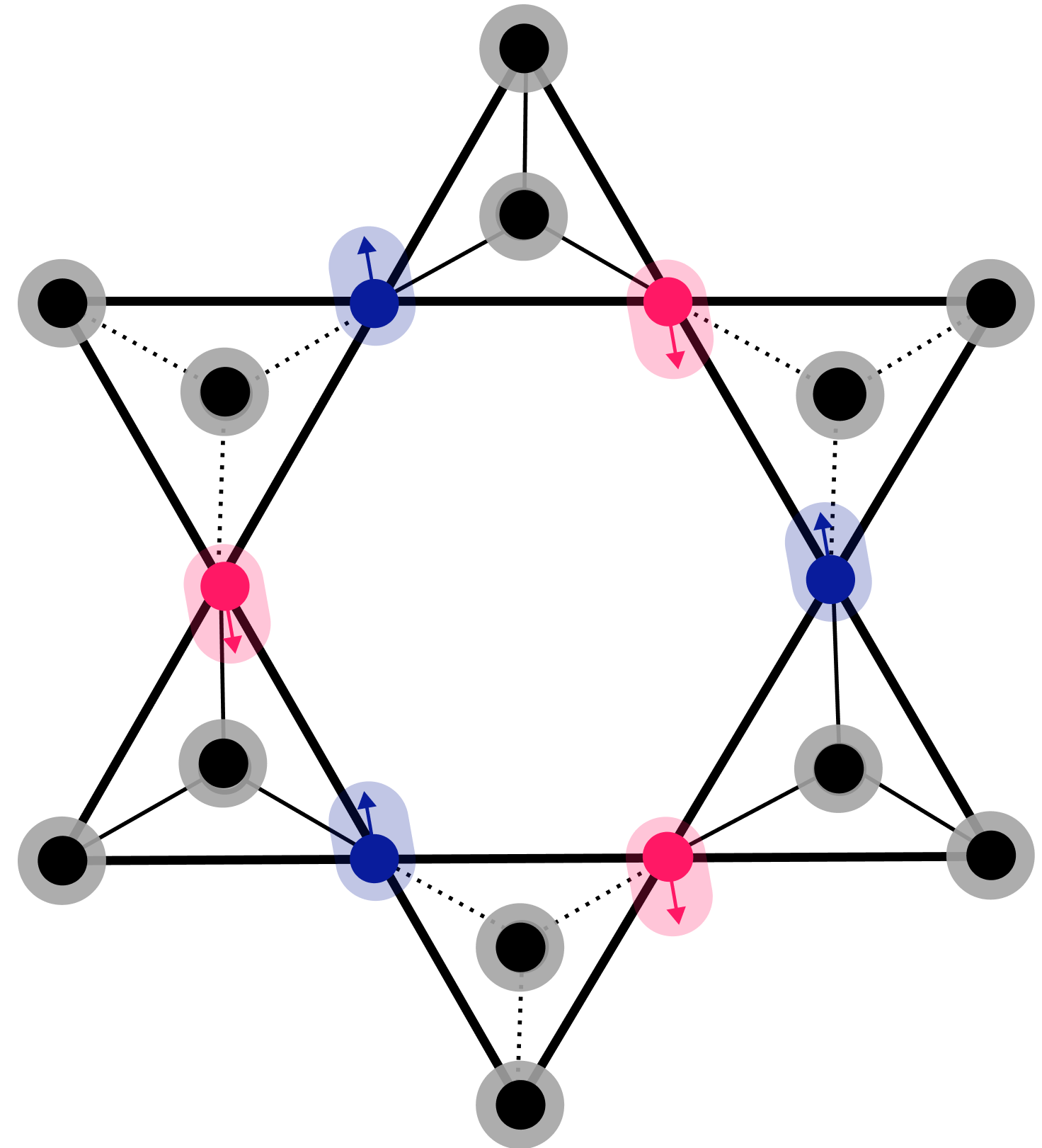
пирохлорная решетка в модели Гейзенберга (АФМ)



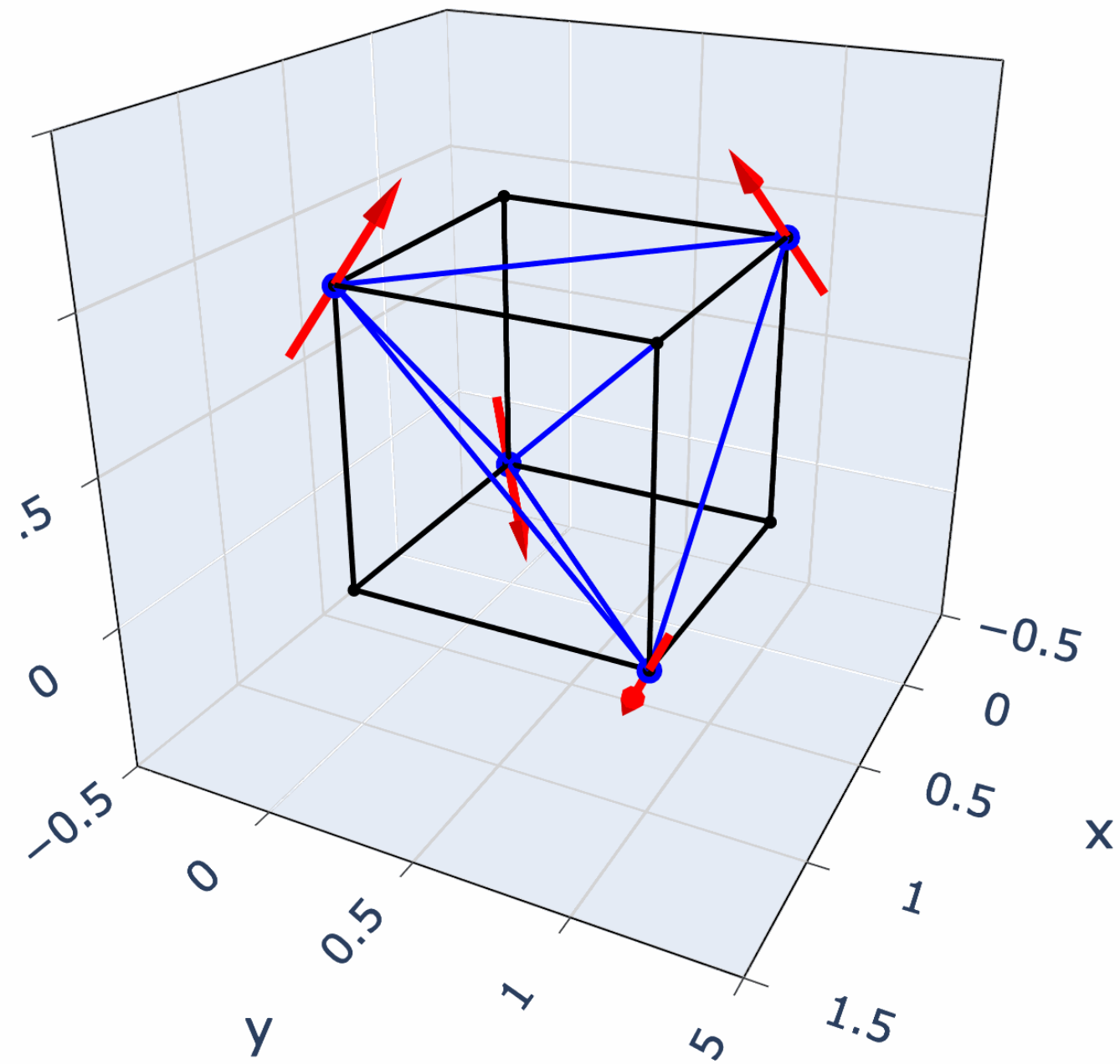
пирохлорная решетка в модели Гейзенберга (АФМ)

макроскопическое вырождение!

$$\sim N$$

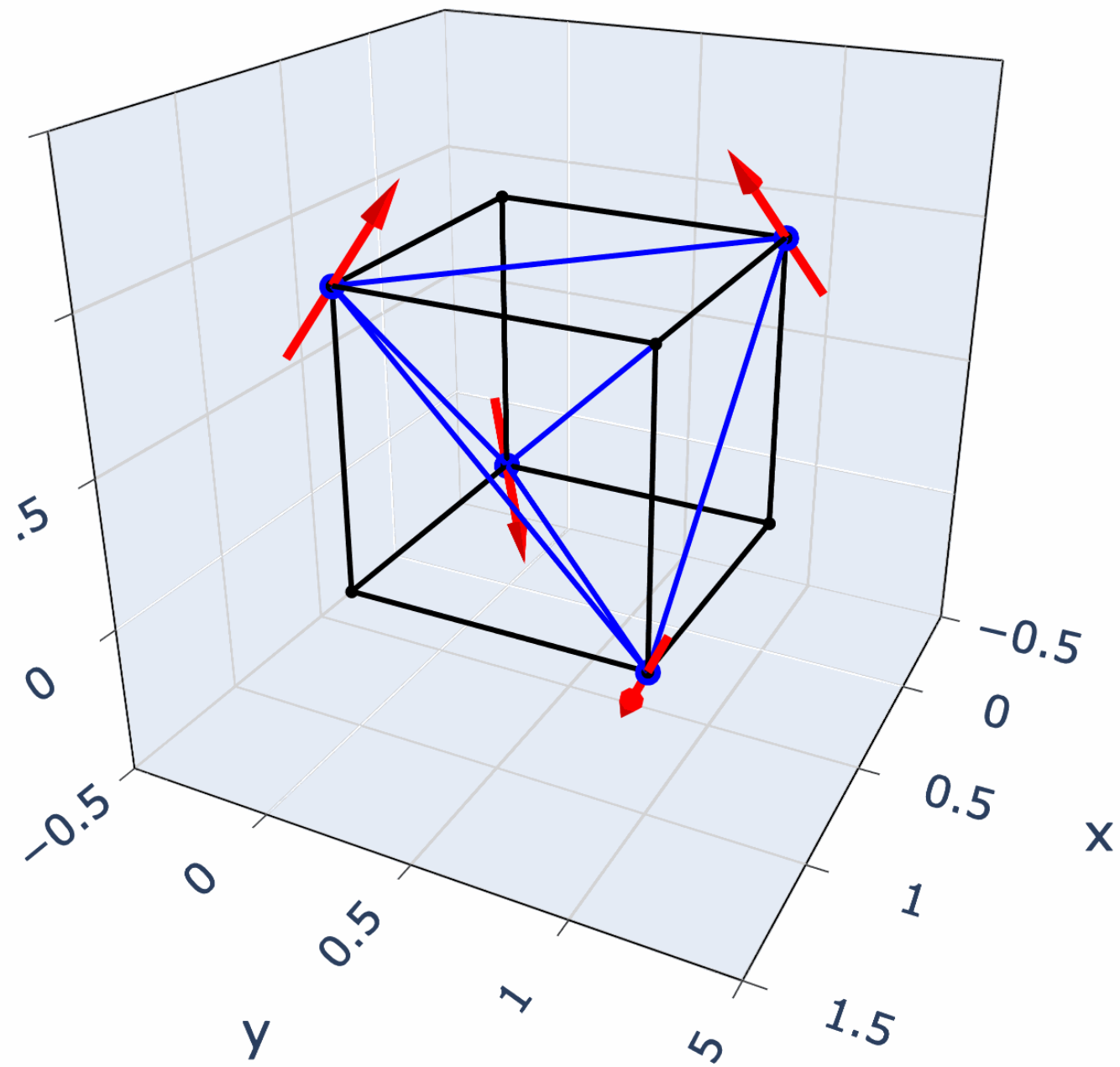


сильная XY-анизотропия



- спины “привязаны” к **локальным** лёгким плоскостям

сильная XY-анизотропия



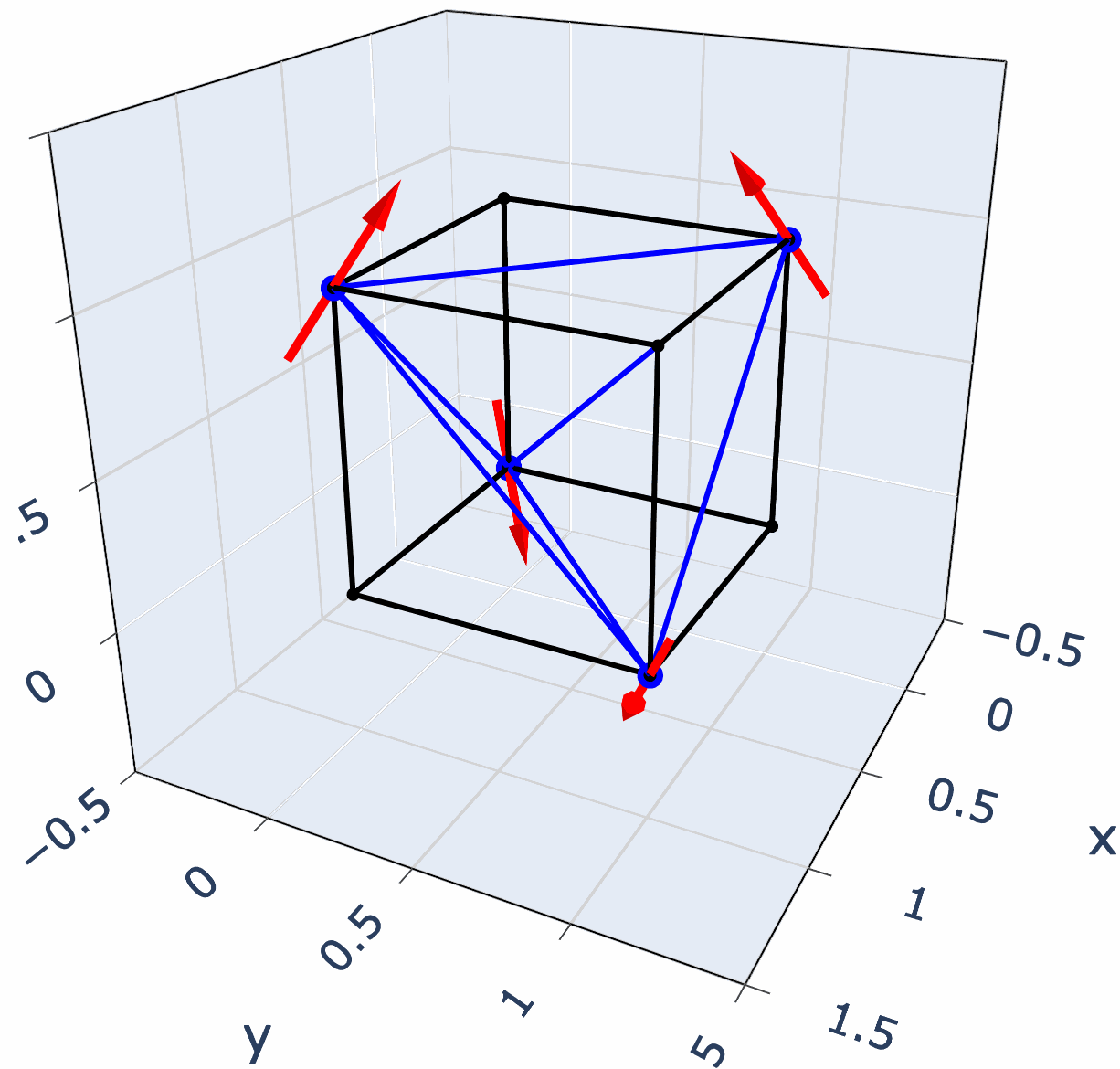
- спины “привязаны” к **локальным лёгким** плоскостям



- **возникает набор состояний, параметризованных углом α**

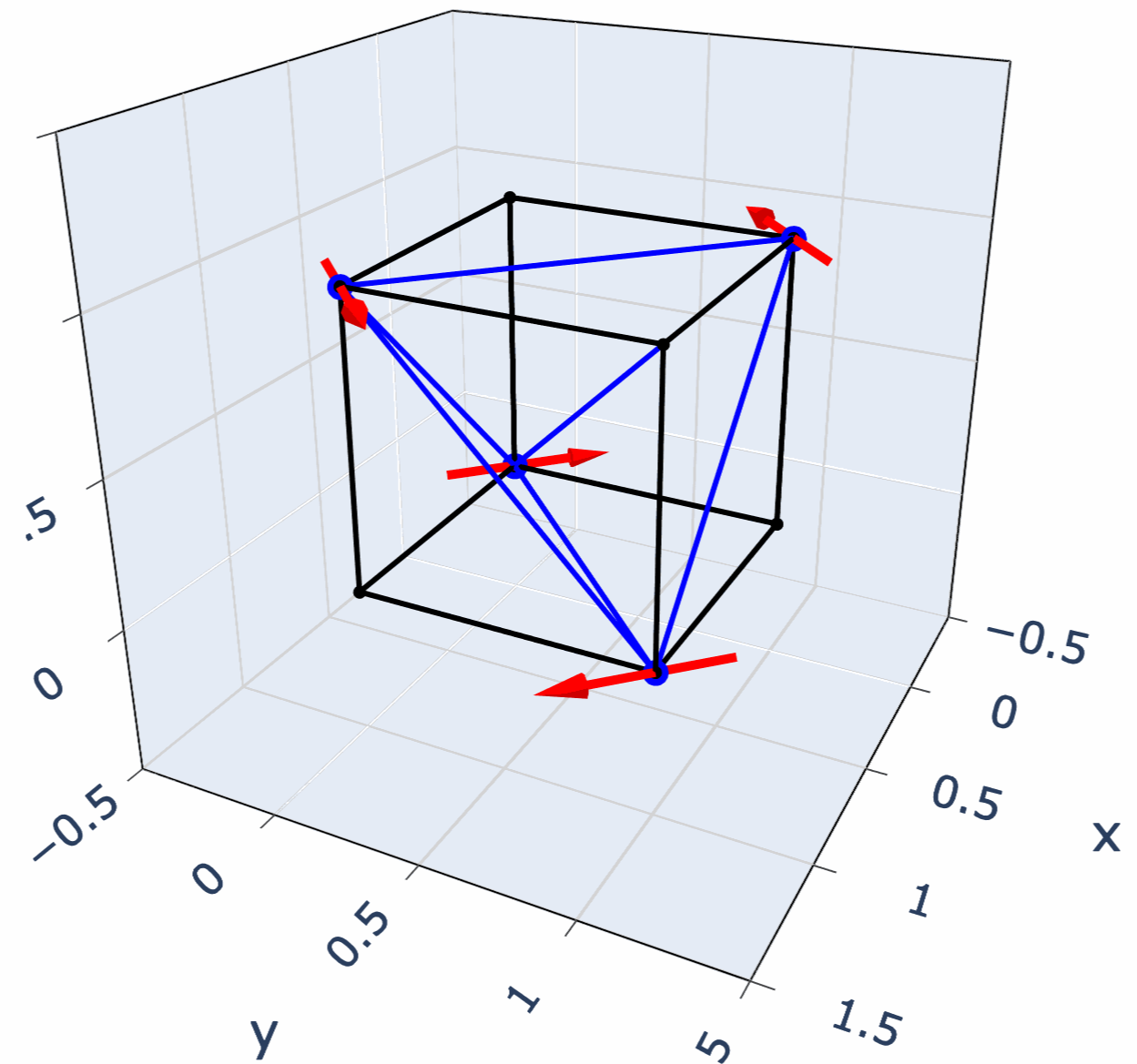
некомпланарная структура

$$\alpha = 0^\circ$$



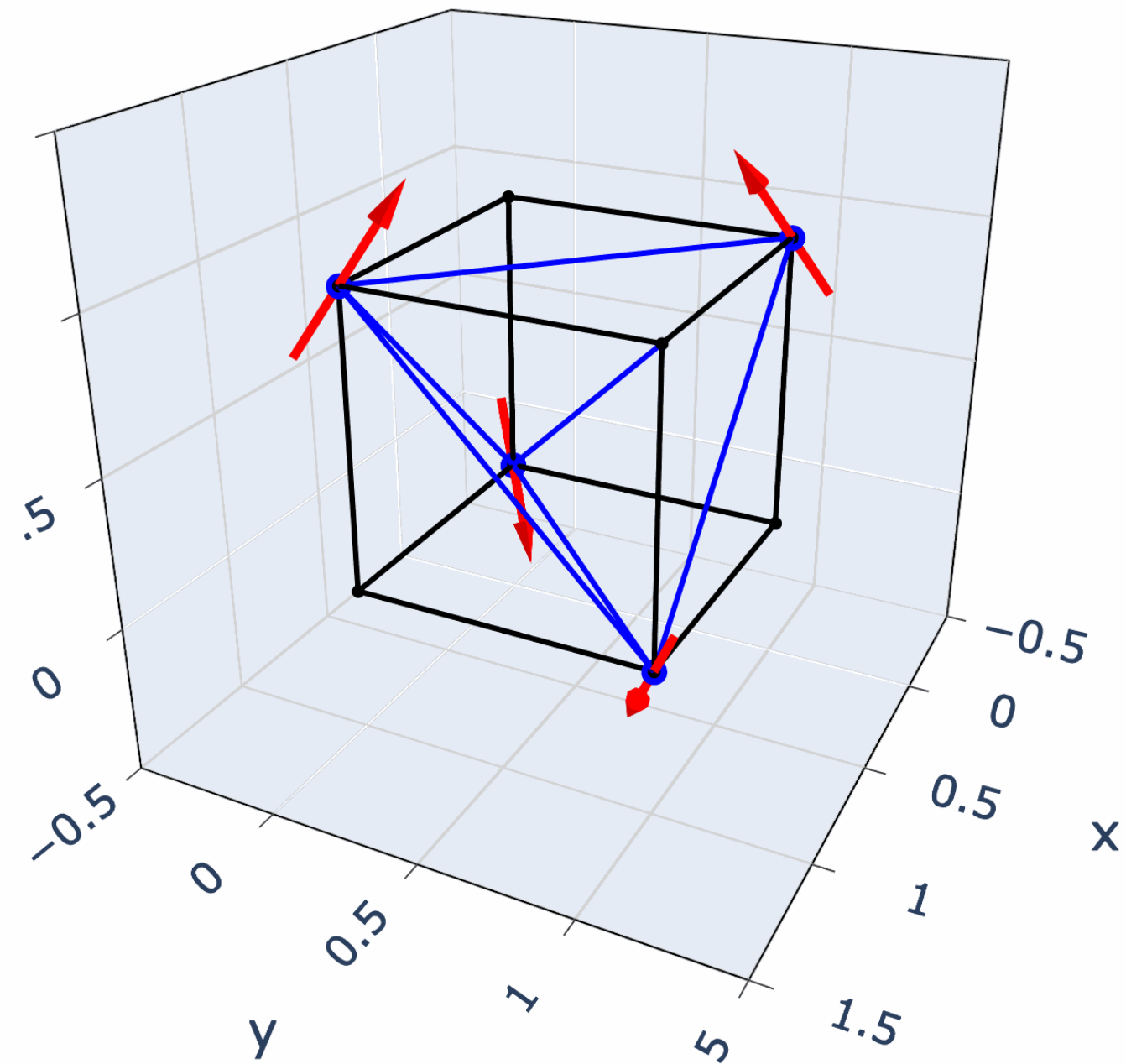
компланарная структура

$$\alpha = 90^\circ$$



$$\mathbf{S}_n(\alpha) = S(\hat{\mathbf{x}}_n \cos \alpha + \hat{\mathbf{y}}_n \sin \alpha), \quad n = 1, \dots, 4$$

сильная XY-анизотропия

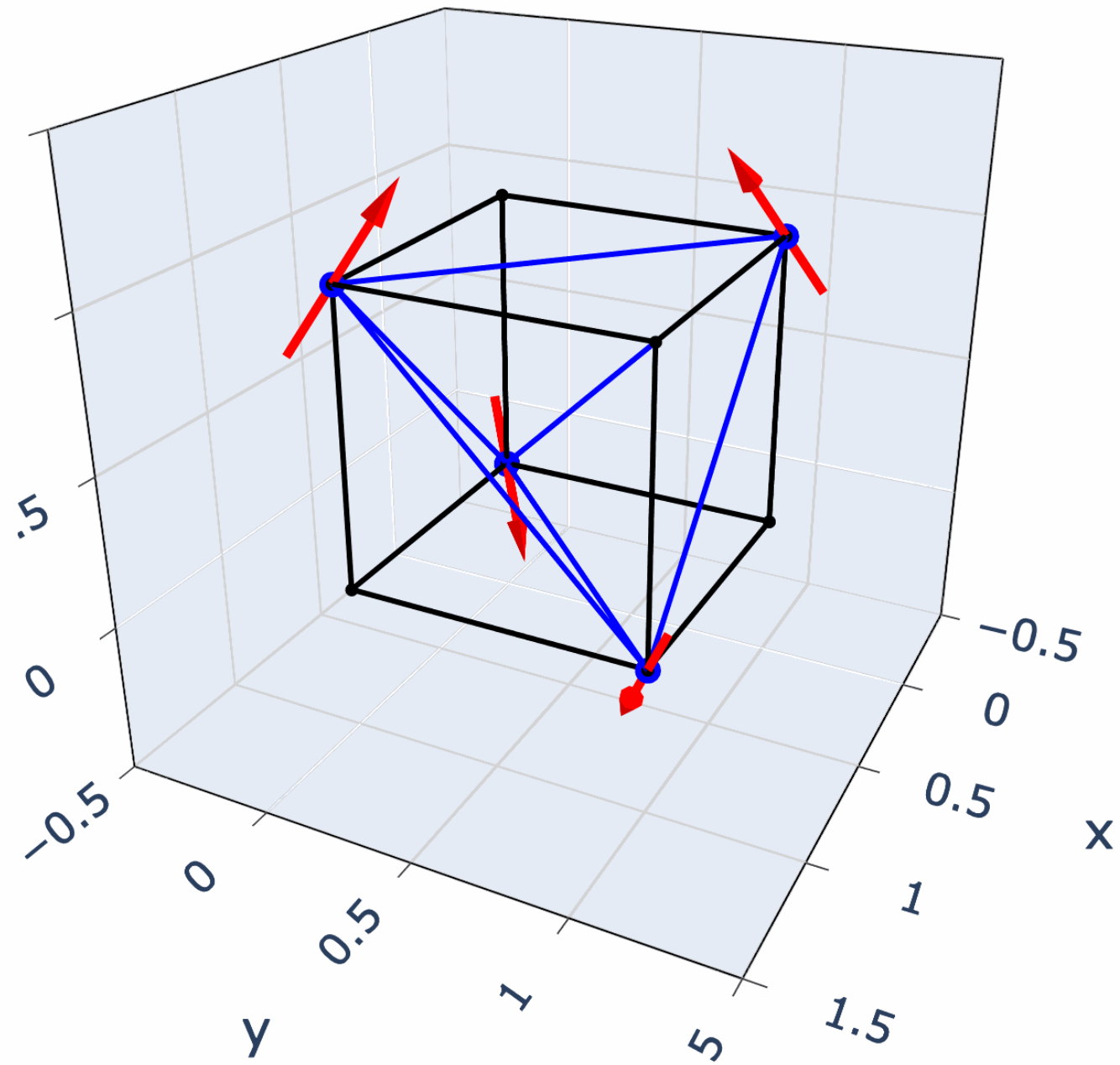


однопараметрическое вырождение!

$$\sim N^{1/3}$$

$$\mathbf{S}_n(\alpha) = S(\hat{\mathbf{x}}_n \cos \alpha + \hat{\mathbf{y}}_n \sin \alpha), \quad n = 1, \dots, 4$$

сильная XY-анизотропия



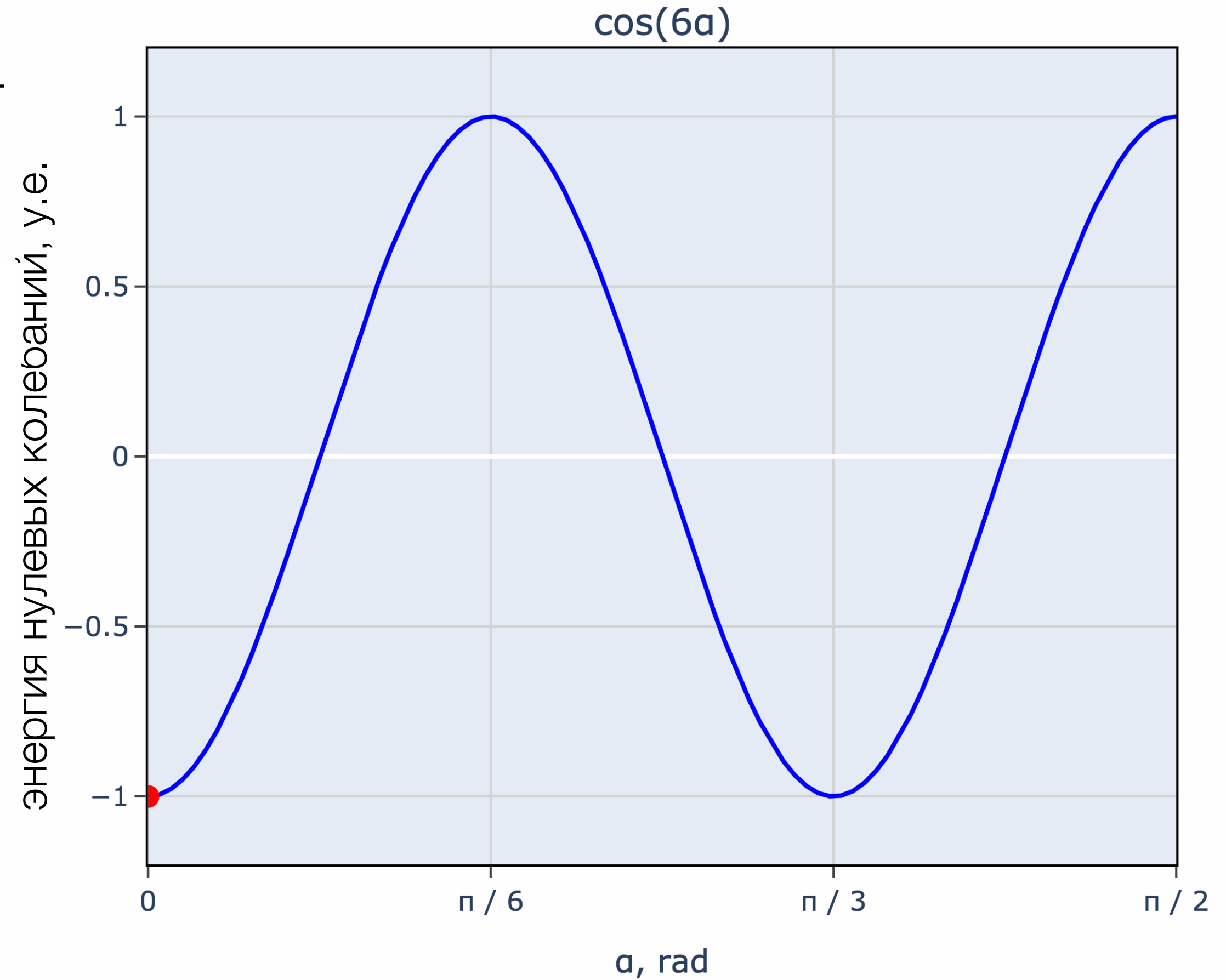
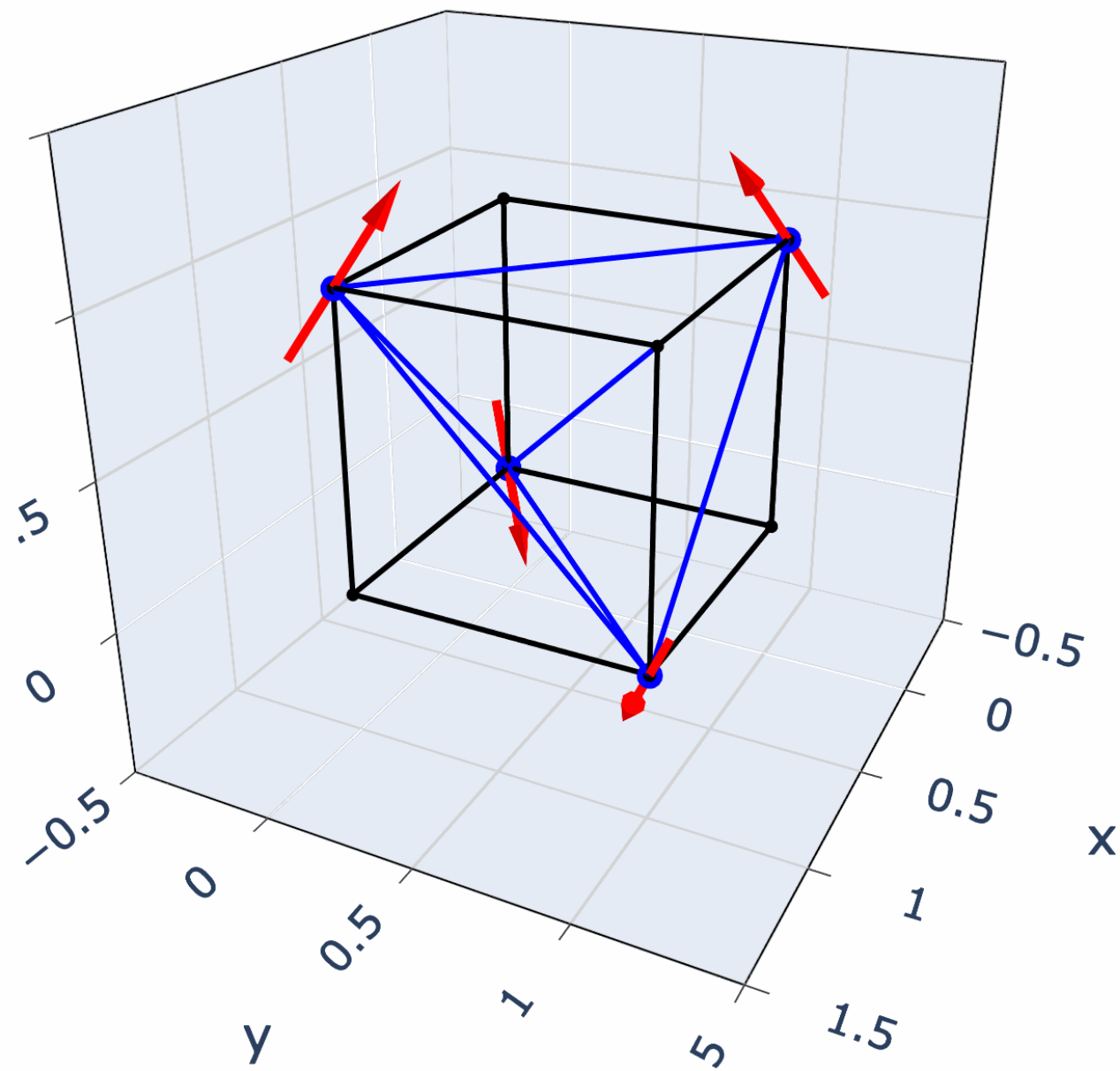
однопараметрическое вырождение

$$\sim N^{1/3}$$

может быть снято за счёт эффекта
“Порядок из беспорядка”

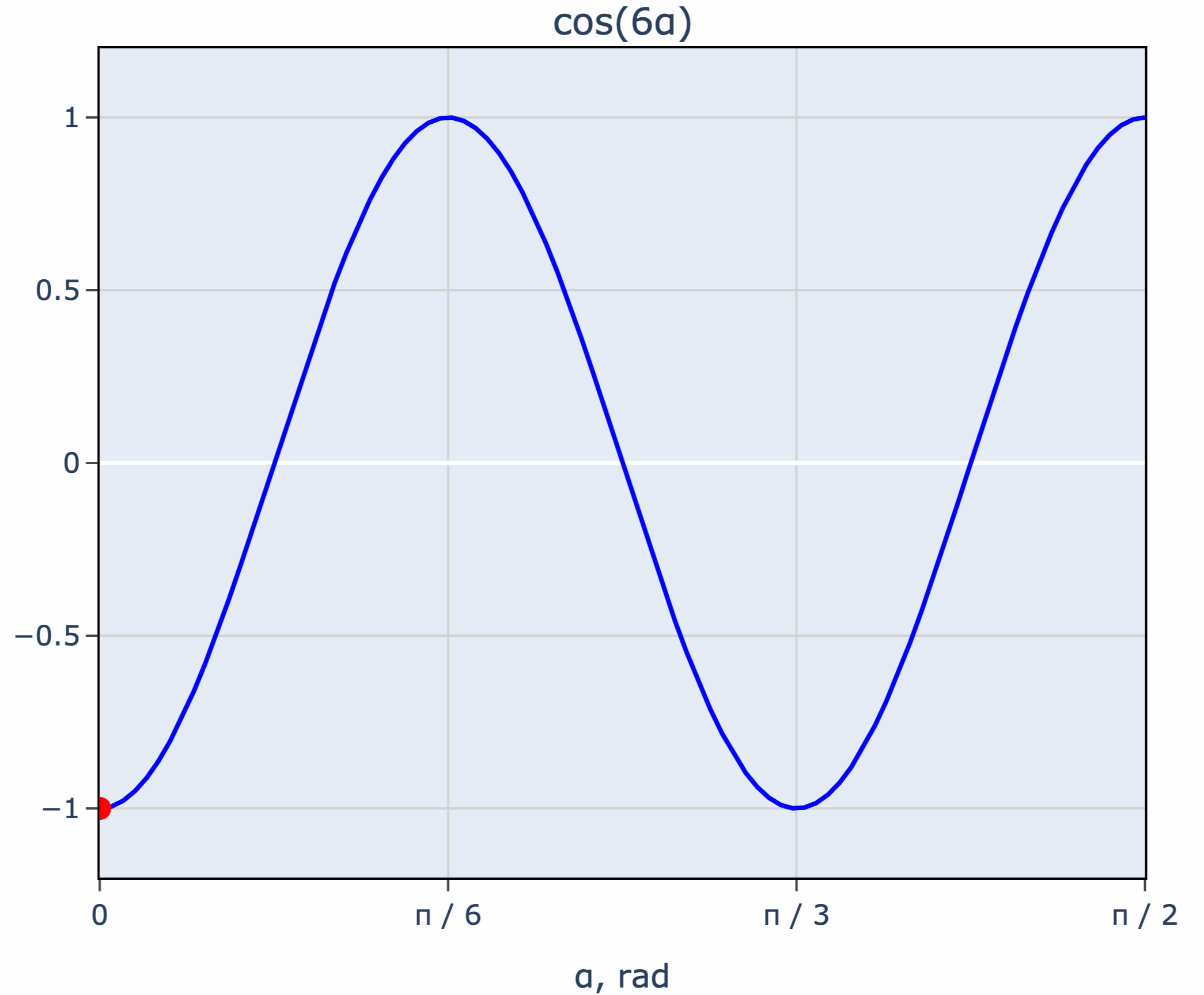
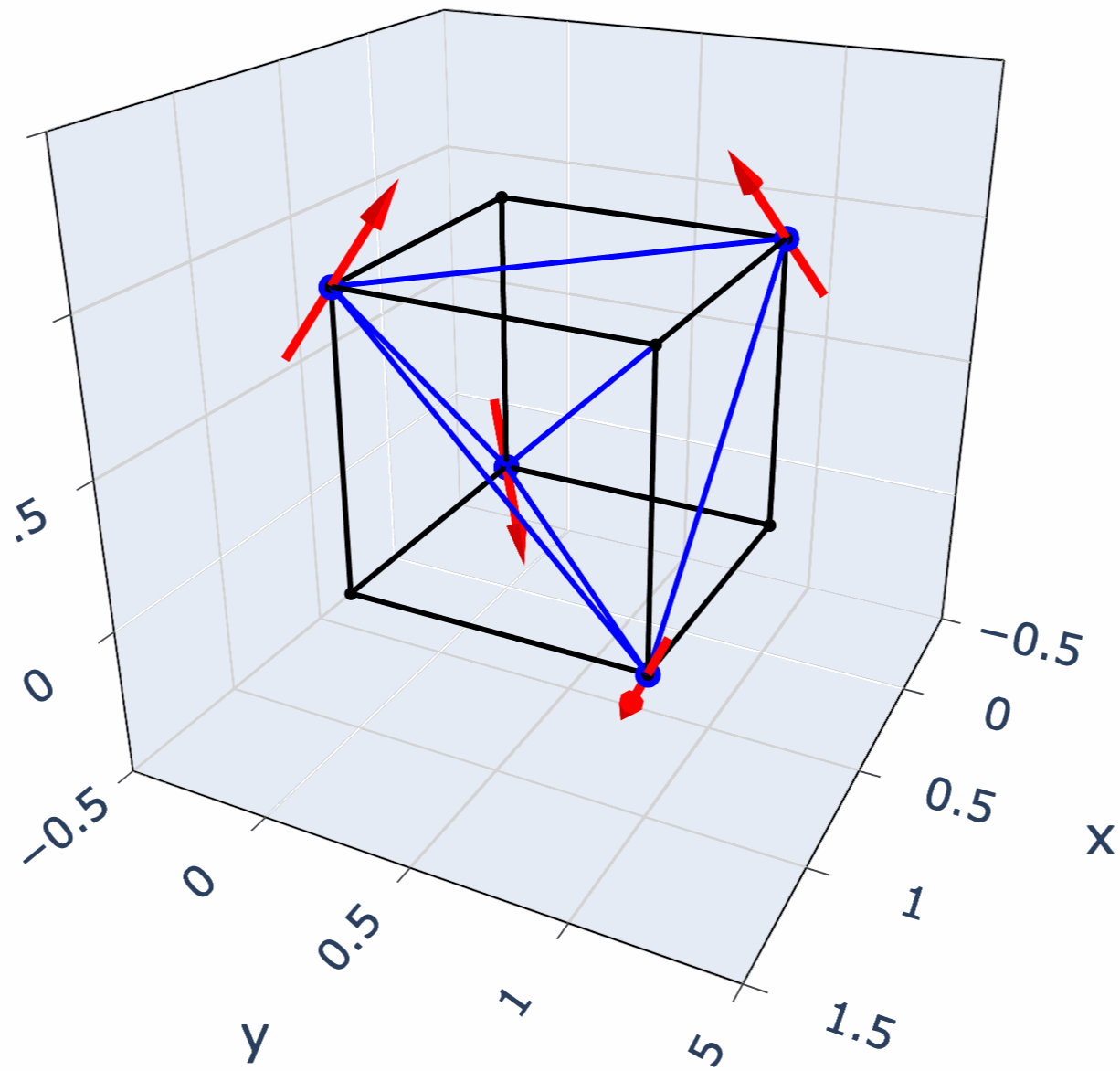
порядок из беспорядка

$$S_n(\alpha) = S(\hat{x}_n \cos \alpha + \hat{y}_n \sin \alpha), \quad n = 1, \dots, 4$$



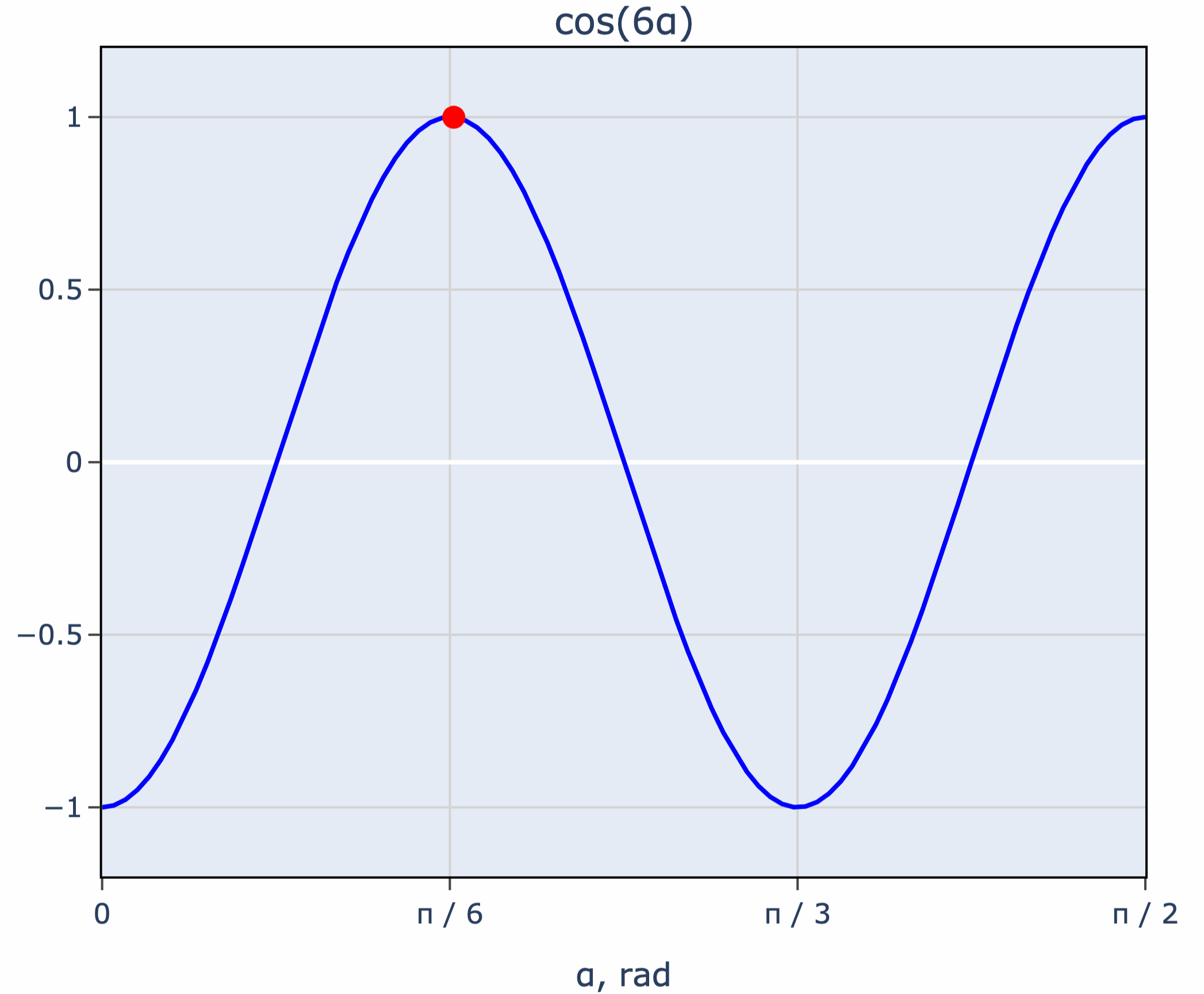
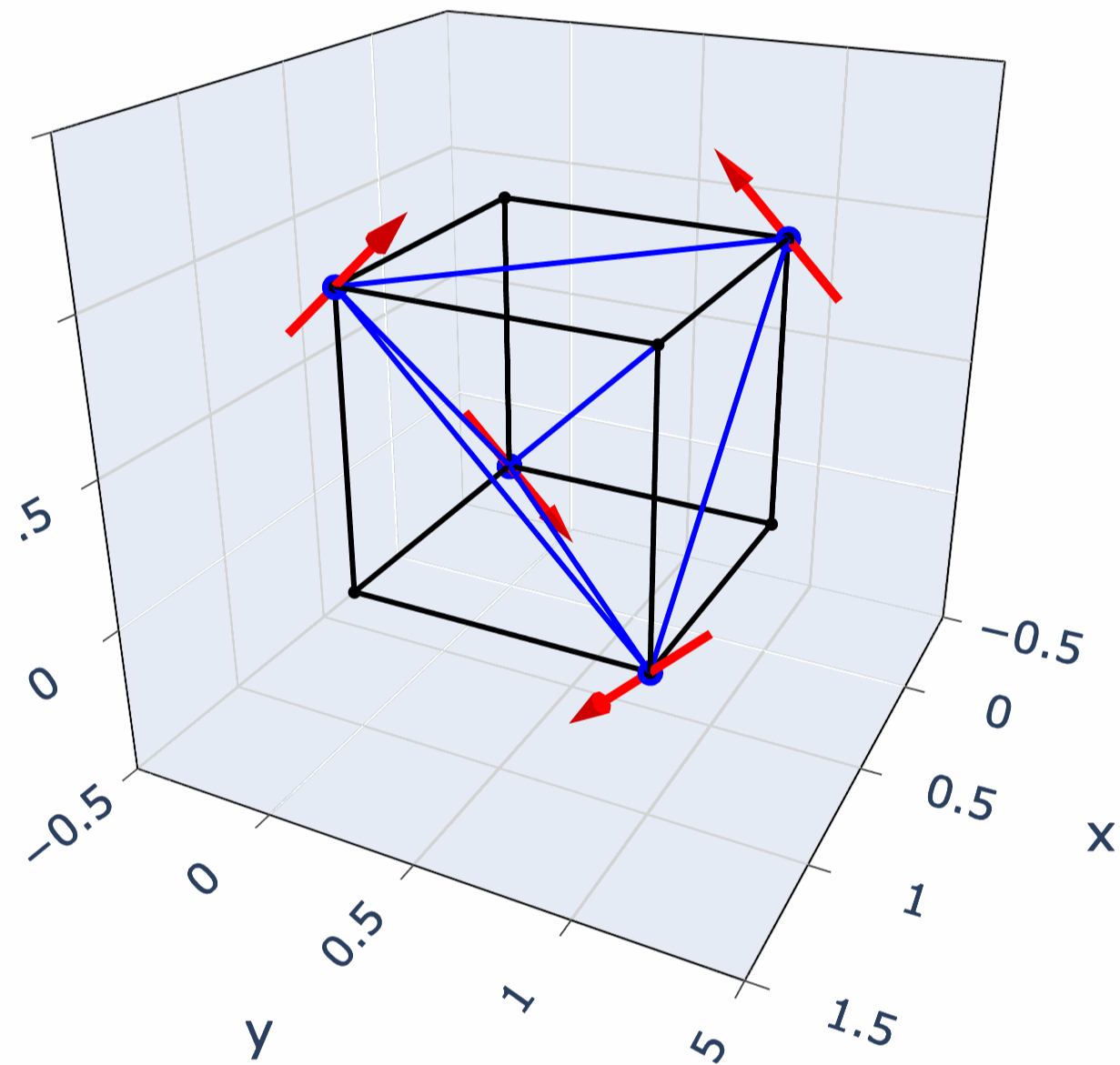
некомпланарная структура

$$\alpha = 0^\circ$$



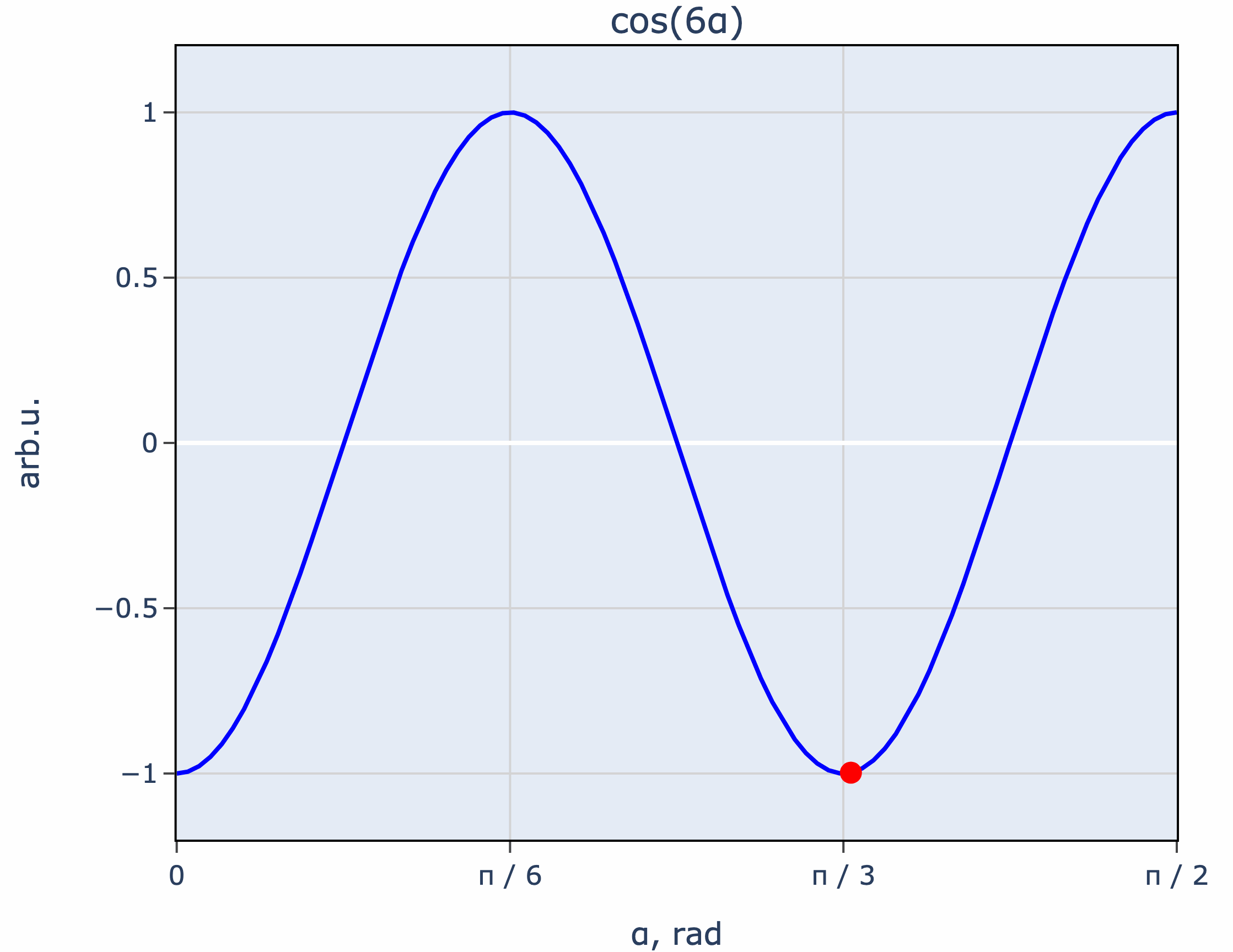
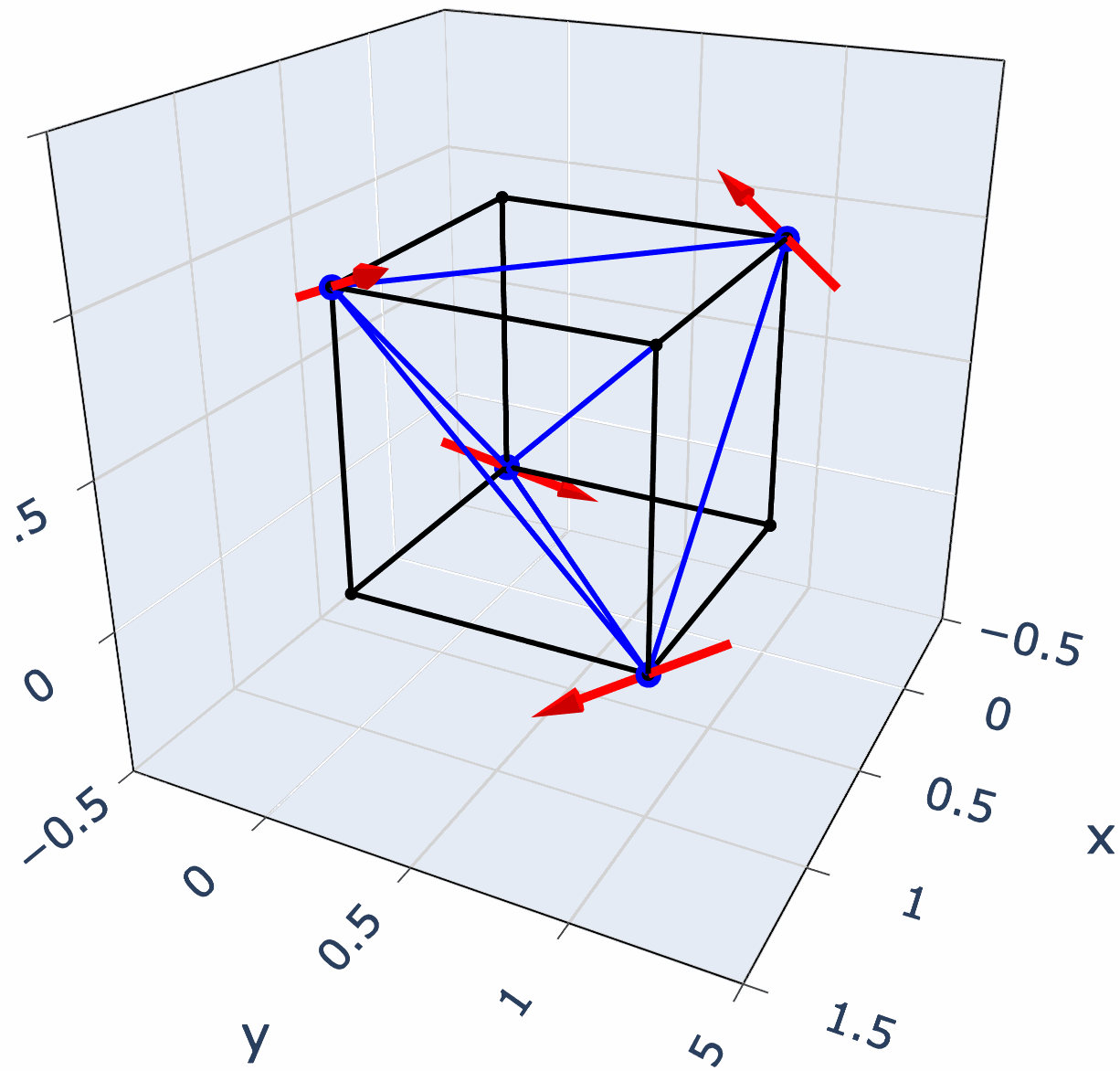
КОМПЛАНАРНАЯ СТРУКТУРА

$$\alpha = 30^\circ$$



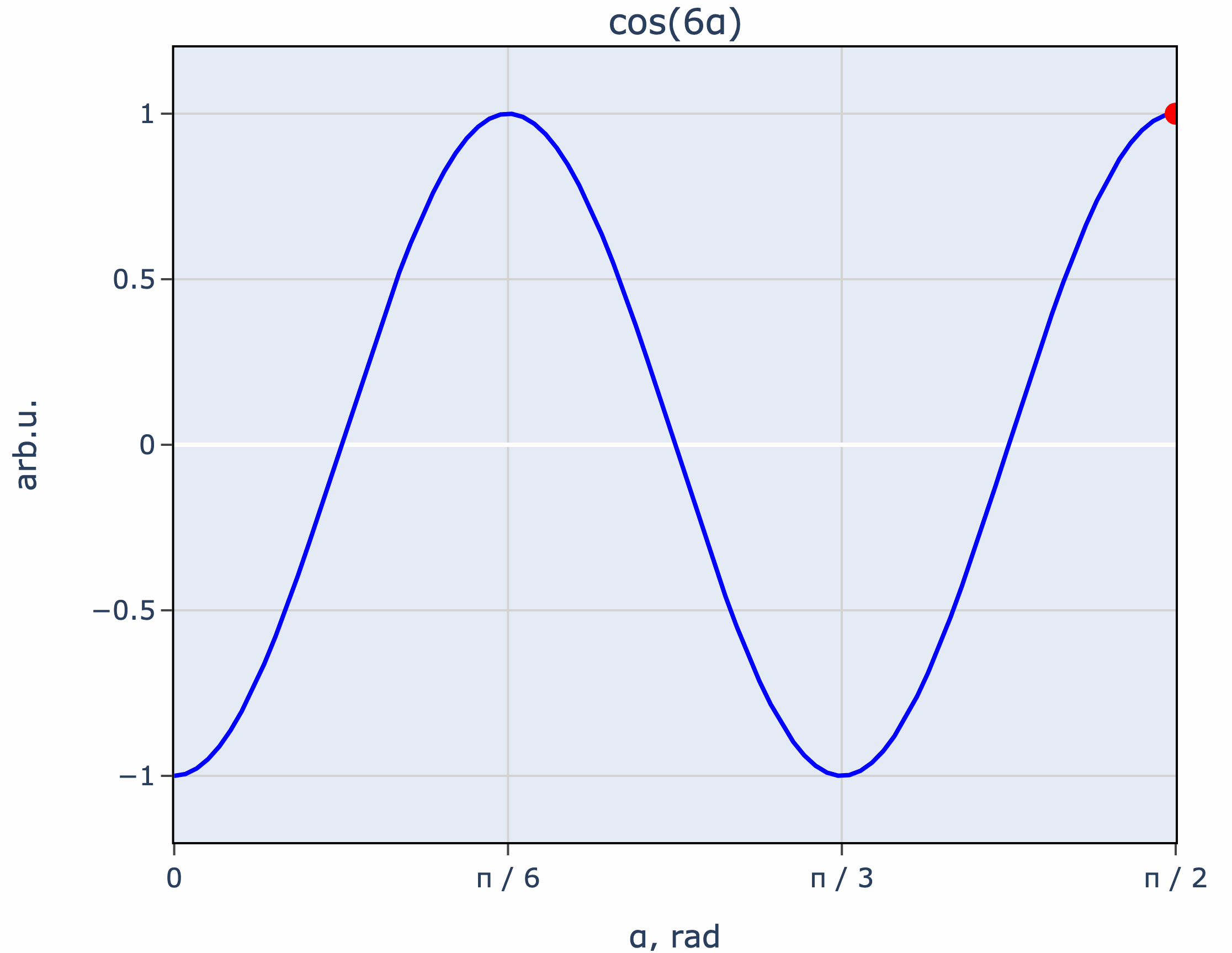
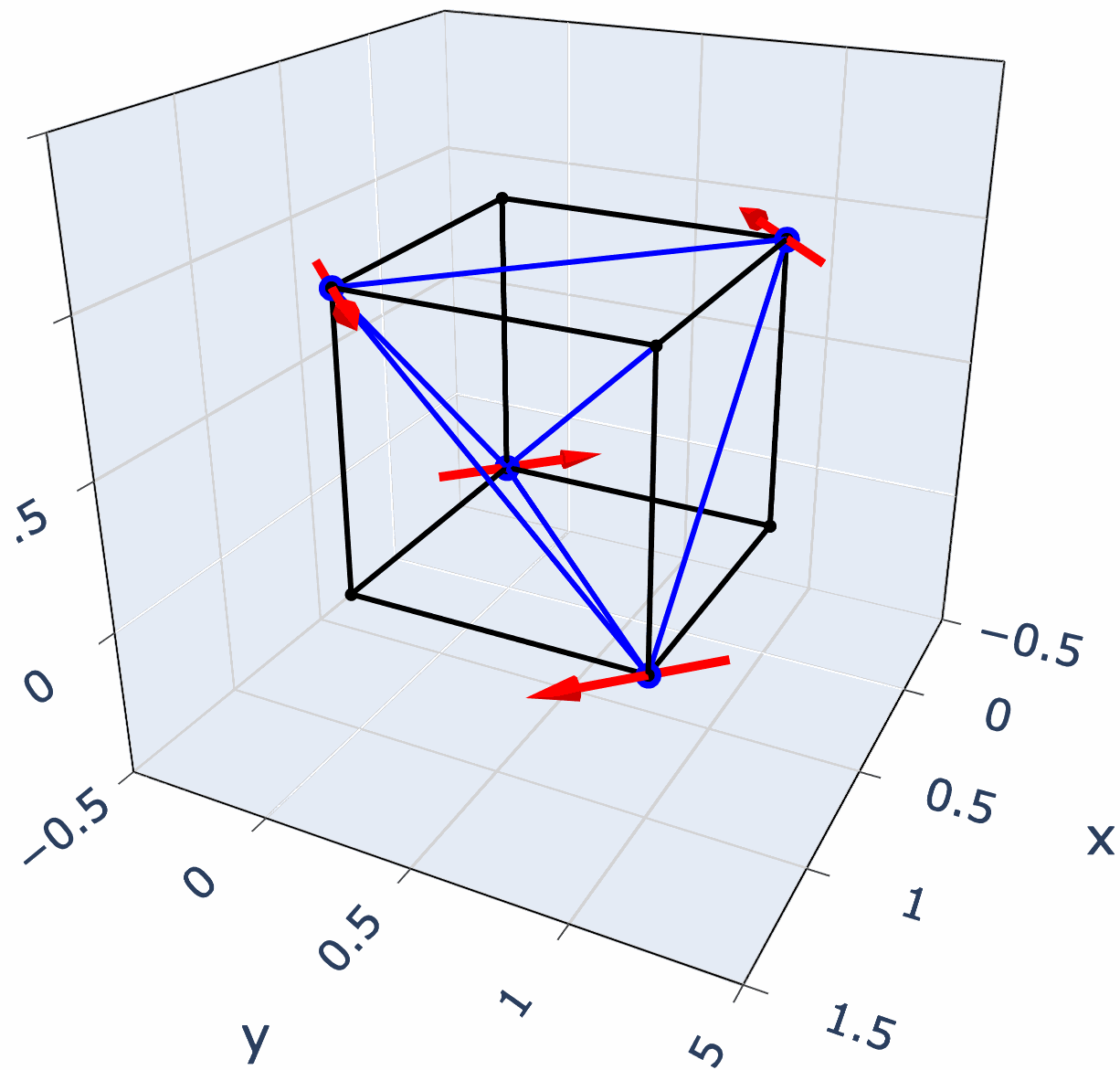
некомпланарная структура

$$\alpha = 60^\circ$$



КОМПЛАНАРНАЯ СТРУКТУРА

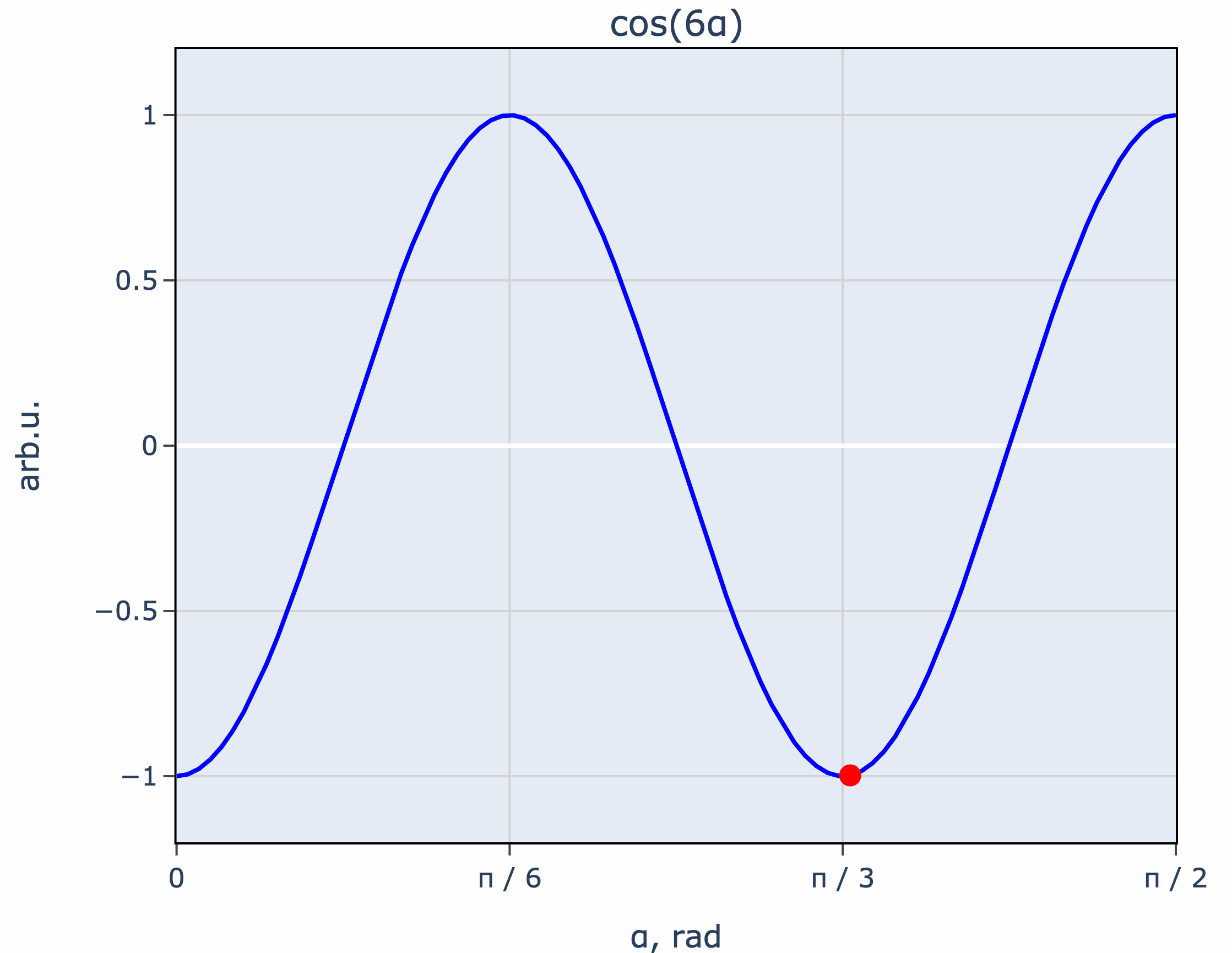
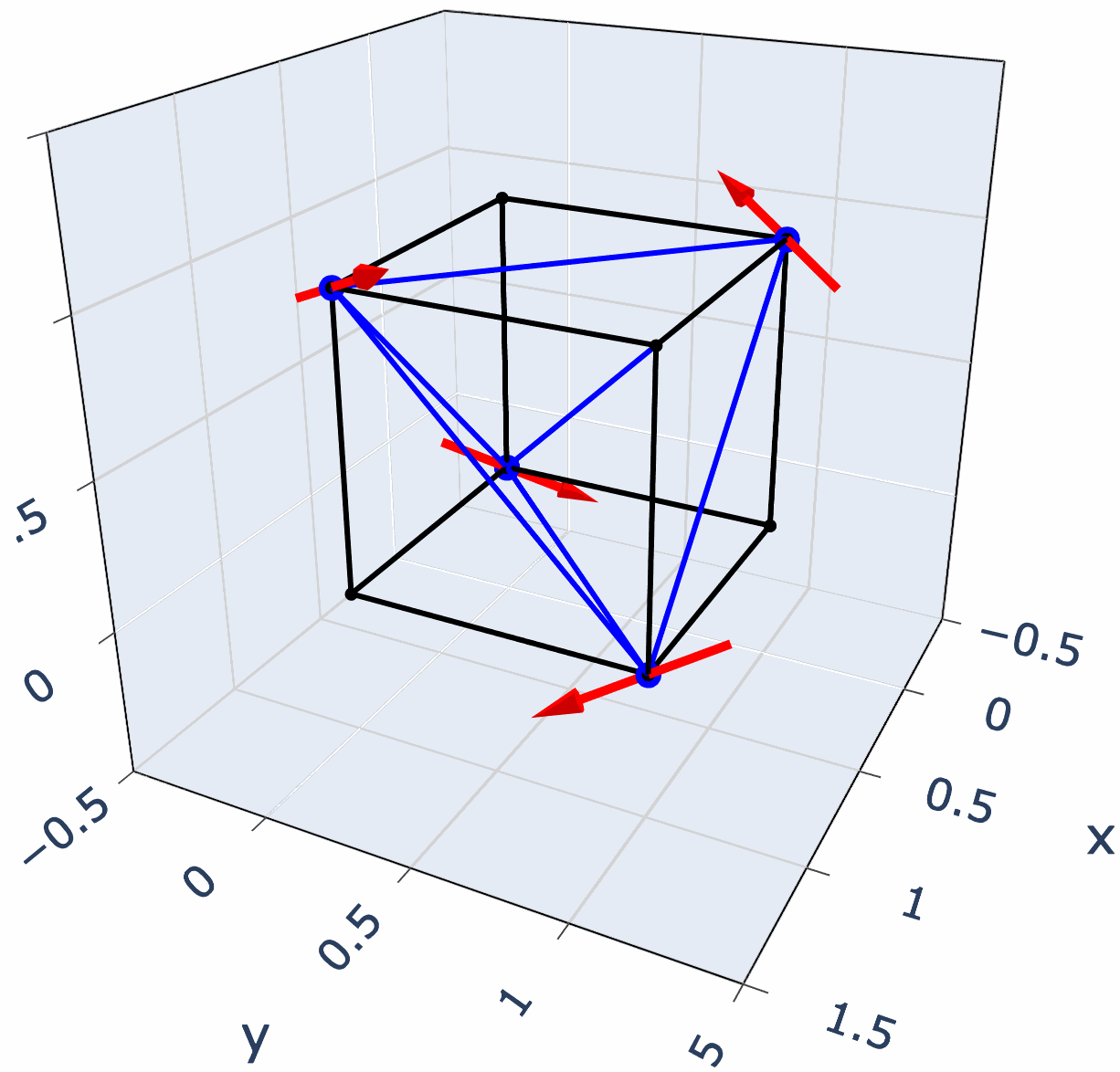
$$\alpha = 90^\circ$$



порядок из беспорядка

ниже $T_N = 1.2$ К реализуются
некомпланарные состояния

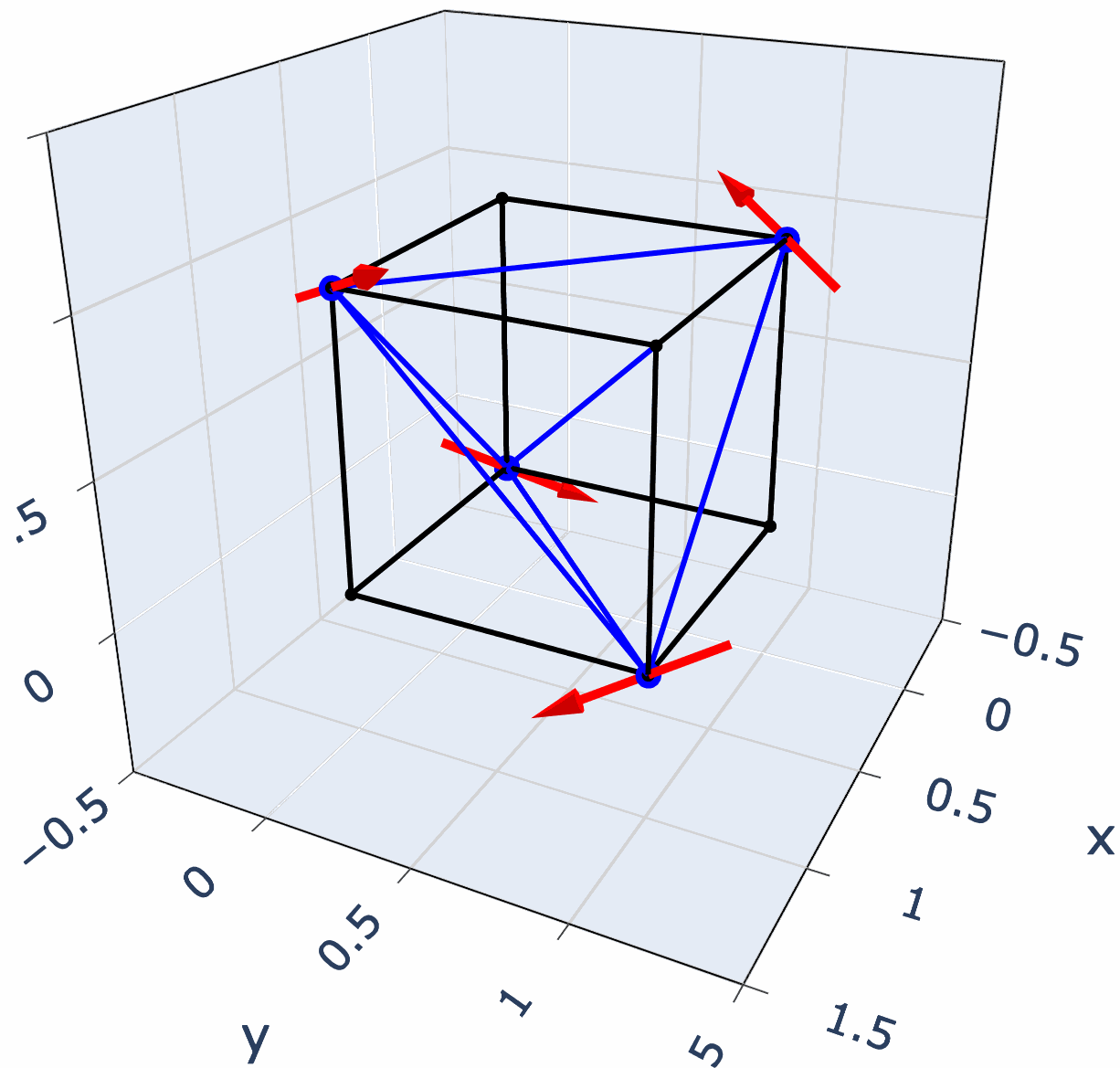
$$\alpha = n \cdot 60^\circ, n = 0, 1, \dots, 5$$



порядок из беспорядка

ниже $T_N = 1.2$ К реализуются
некомпланарные состояния

$$\alpha = n \cdot 60^\circ, n = 0, 1, \dots, 5$$



U(1) вырождение снято за счёт
квантовых флуктуаций

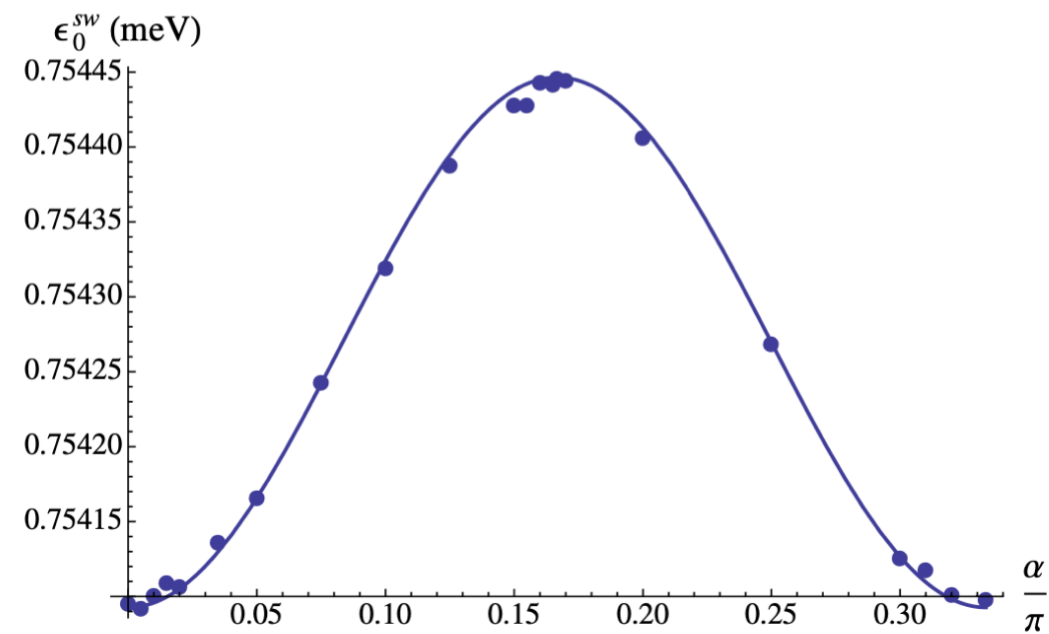


В спектре возбуждений спиновых
волн открывается щель

ЩЕЛЬ В СПЕКТРЕ ВОЗБУЖДЕНИЙ

Теория

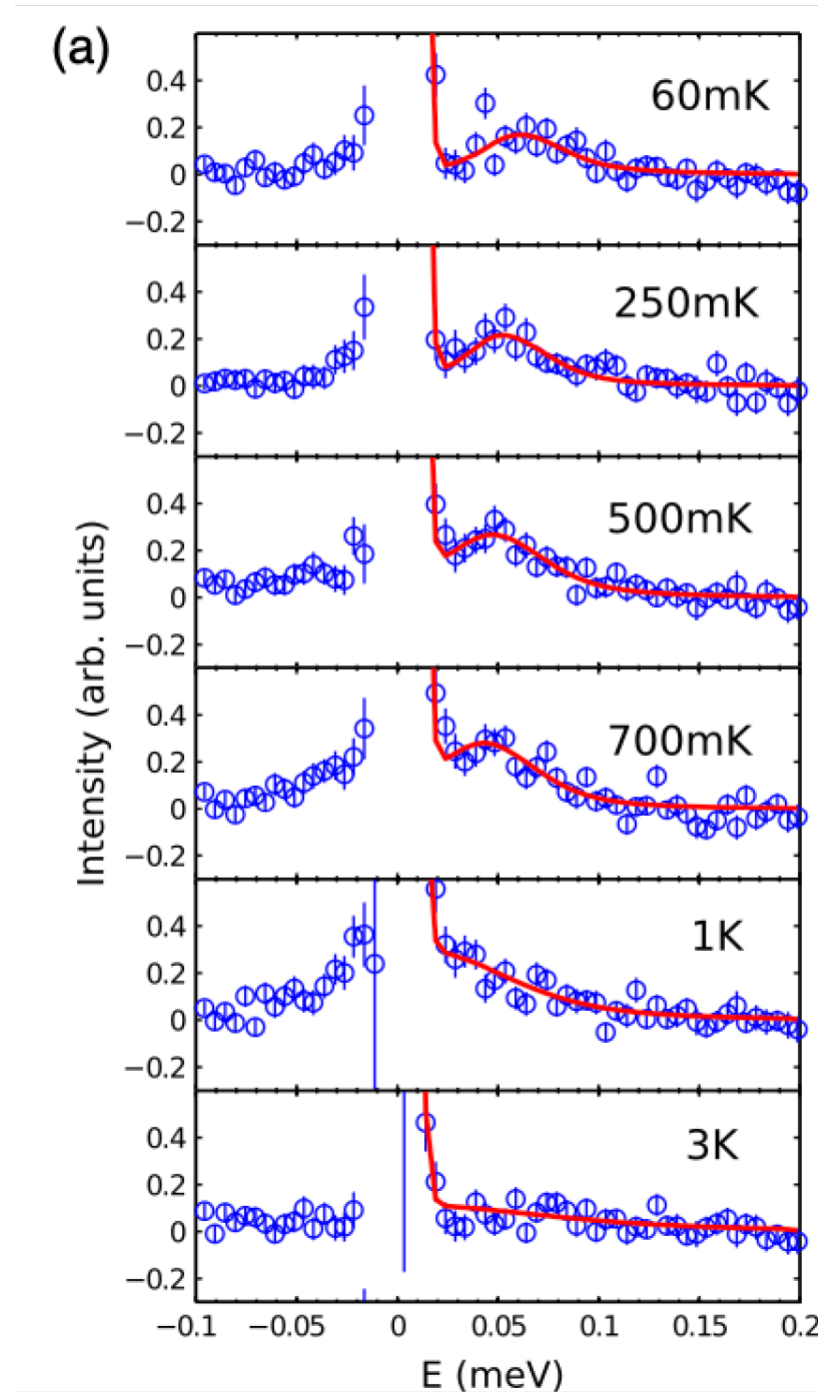
$$\Delta = \sqrt{\frac{18\lambda}{\eta}} \approx 0.02 \text{ мЭВ}$$



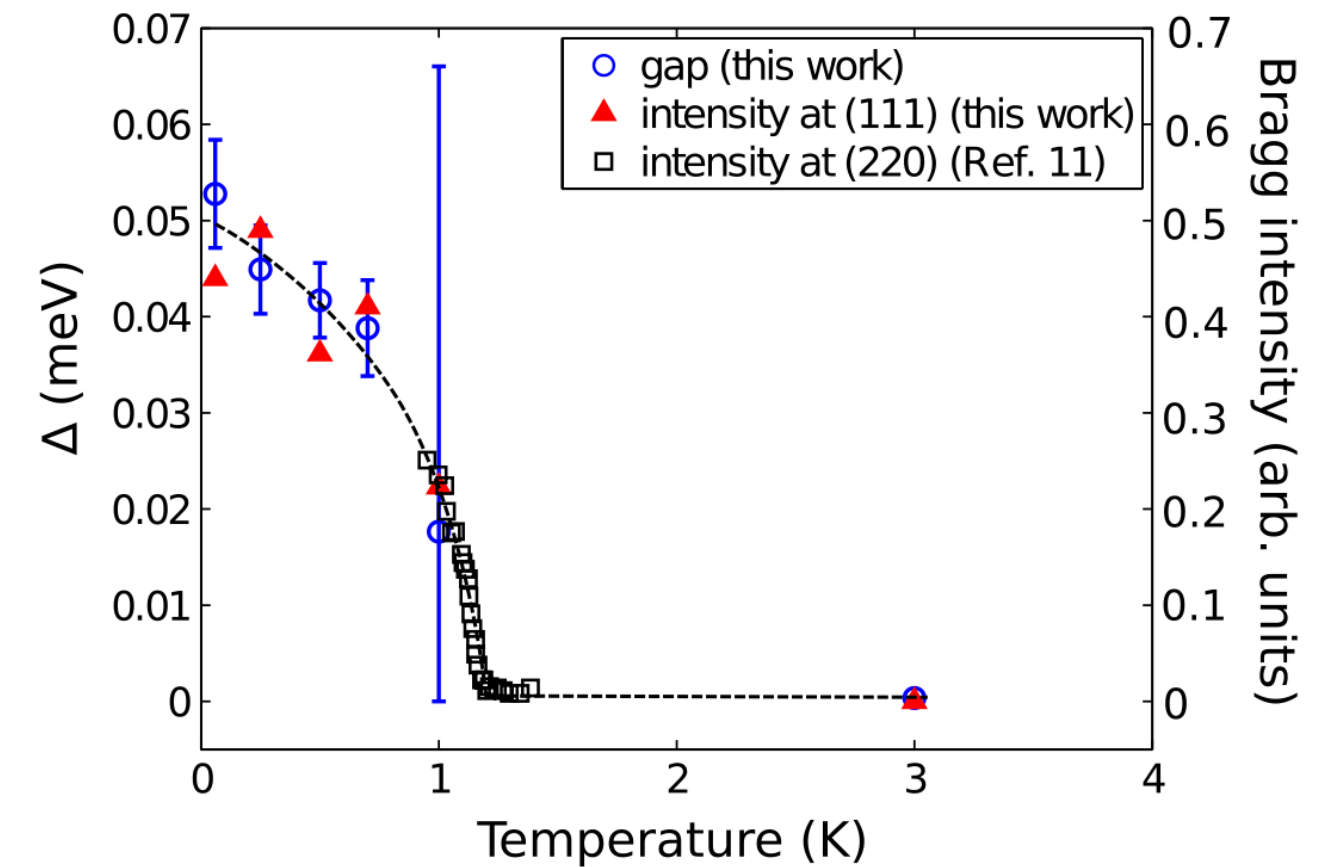
L. Savary et al., PRL (2012)

Эксперимент

$$\Delta \approx 0.05 \text{ мЭВ}$$



K. A. Ross et al., PRL (2014)



зануляется выше T_N

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ НА ЩЕЛЬ

PHYSICAL REVIEW B **95**, 134426 (2017)

Field-induced phase diagram of the XY pyrochlore antiferromagnet $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

E. Lhotel,^{1,*} J. Robert,¹ E. Ressouche,² F. Damay,³ I. Mirebeau,³ J. Ollivier,⁴ H. Mutka,⁴
P. Dalmas de Réotier,² A. Yaouanc,² C. Marin,² C. Decorse,⁵ and S. Petit^{3,†}

¹Institut Néel, CNRS and Université Grenoble Alpes, 38042 Grenoble, France

²INAC, CEA and Université Grenoble Alpes, CEA Grenoble, 38054 Grenoble, France

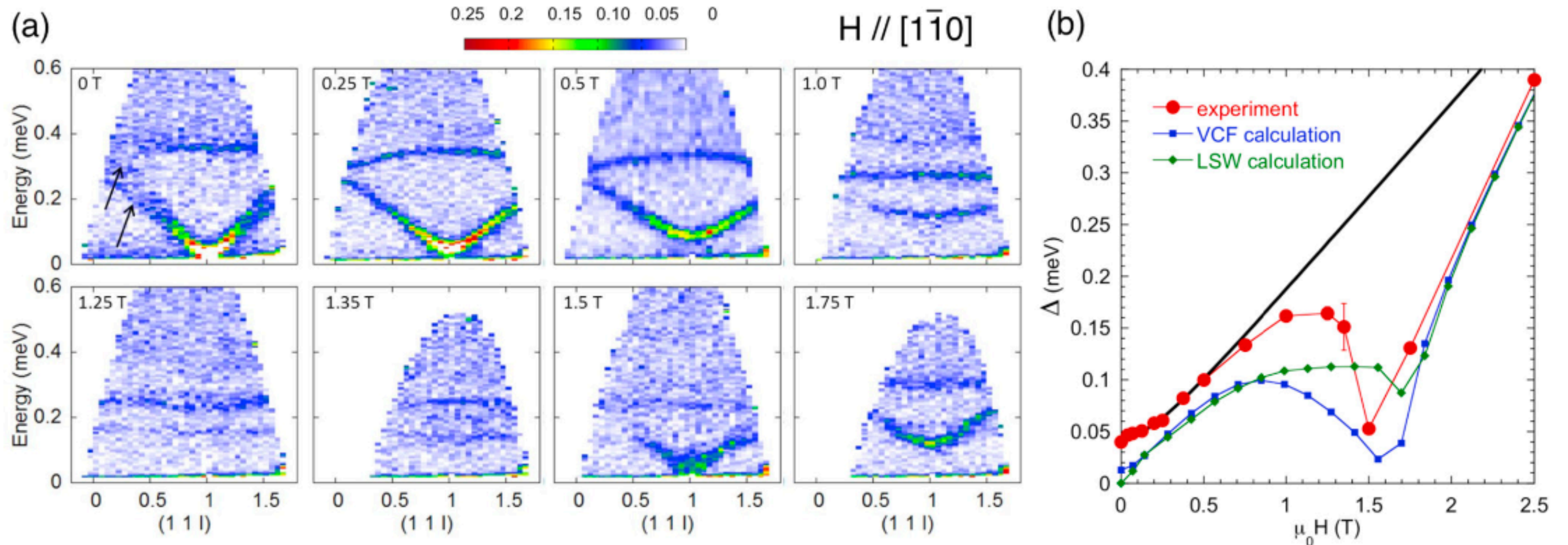
³Laboratoire Léon Brillouin, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CE-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁴Institut Laue Langevin, CS 20156, 38042 Grenoble, France

⁵ICMMO, Université Paris-Saclay, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

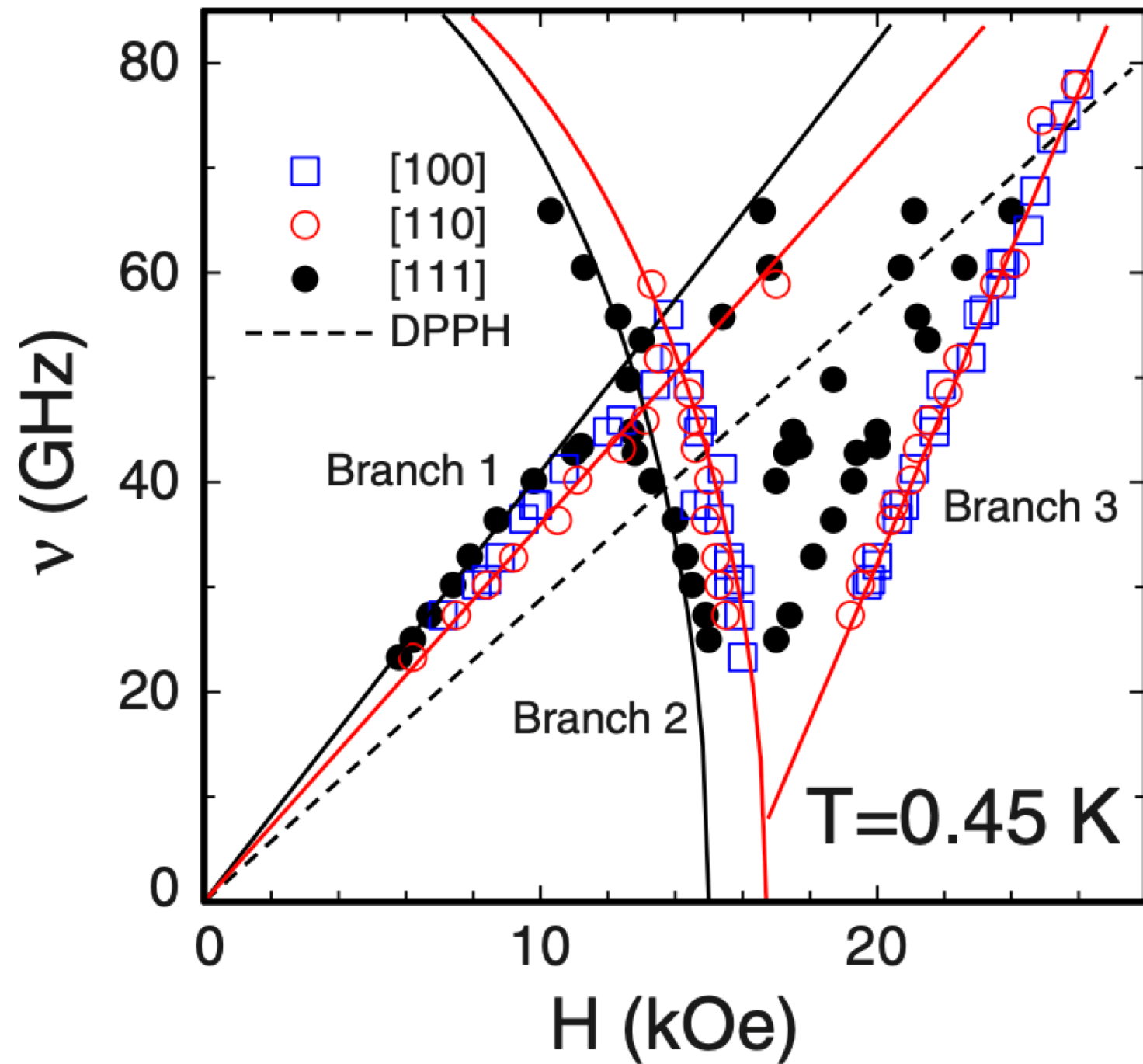
(Received 24 January 2017; revised manuscript received 24 March 2017; published 18 April 2017)

ождается, что щель имеет сложную зависимость от магнитного поля



E. Lhotel et al., PRB (2017)

АФМР на частотах выше щели



$$\gamma^{[100]} = 3.8 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

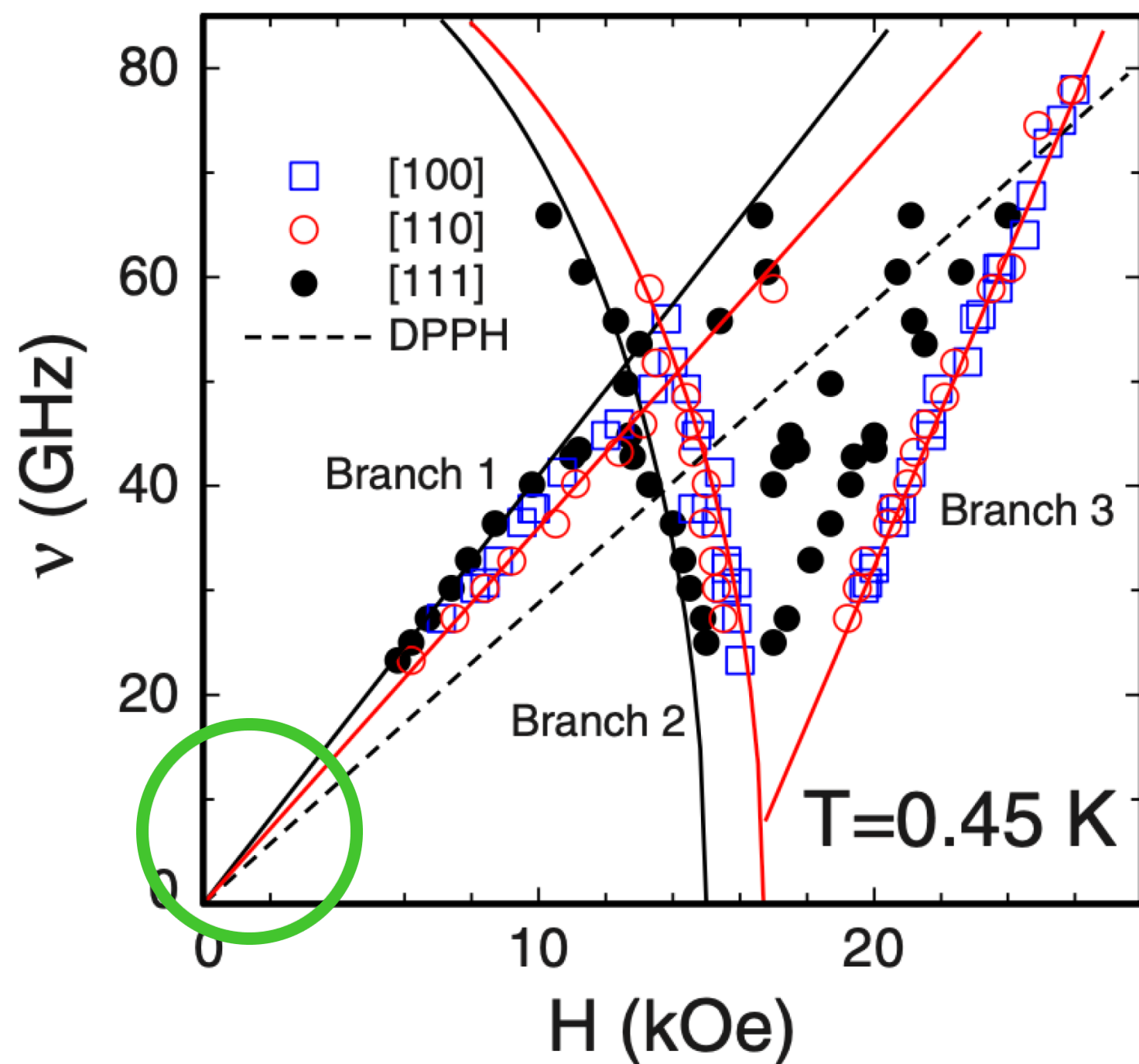
$$\gamma^{[111]} = 4.1 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

$$\gamma^{[110]} = 3.6 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

мода 1 практически изотропна

S. S. Sosin et al., PRB (2010)

ДФМР на частотах выше щели



$$\gamma^{[100]} = 3.8 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

$$\gamma^{[111]} = 4.1 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

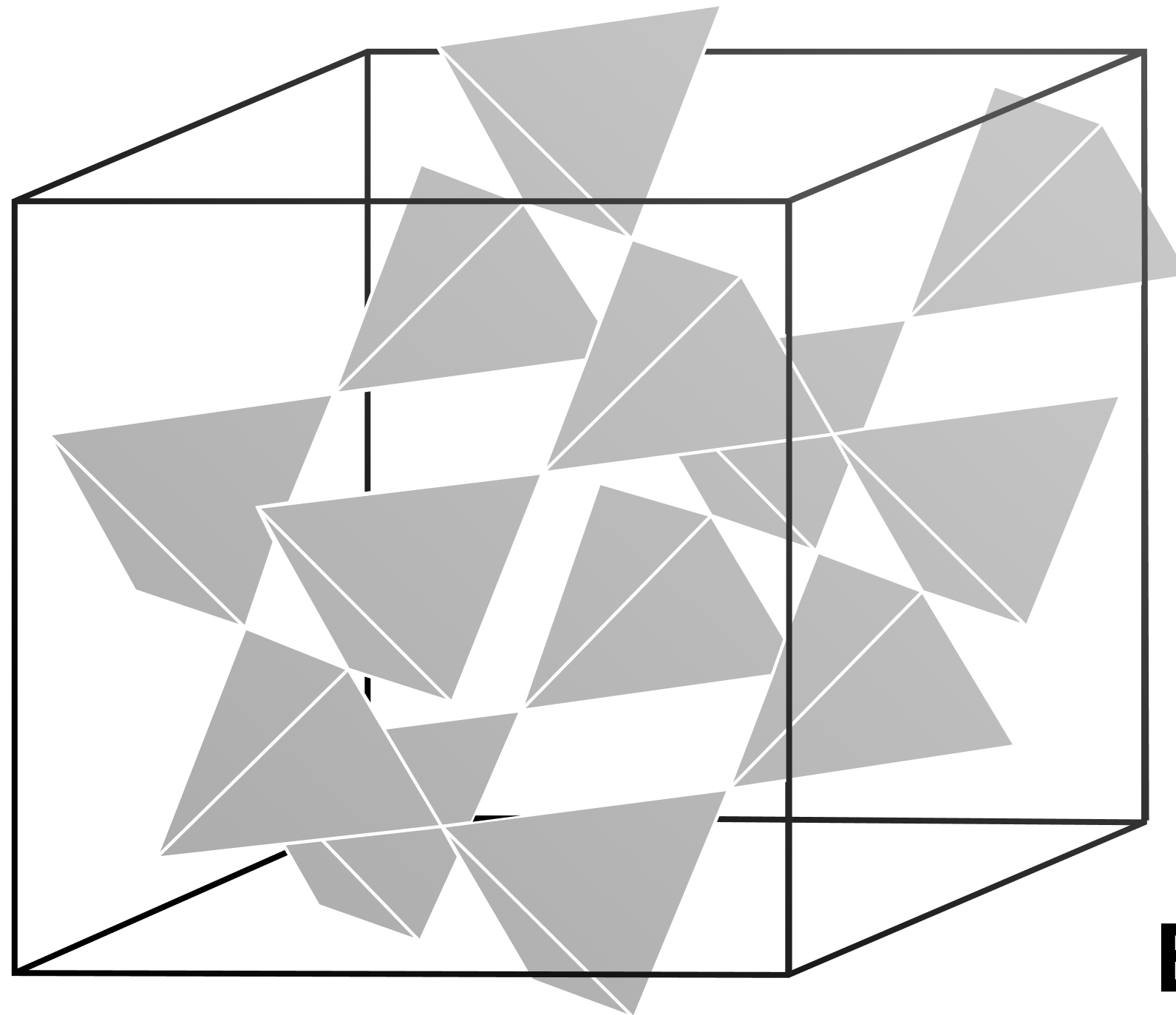
$$\gamma^{[110]} = 3.6 \pm 0.1 \text{ ГГц/кЭ}$$

мода 1 практически изотропна,
но допускается существование щели
при $H=0$ не более ~ 10 ГГц (0.04 мЭв)

S. S. Sosin et al., PRB (2010)

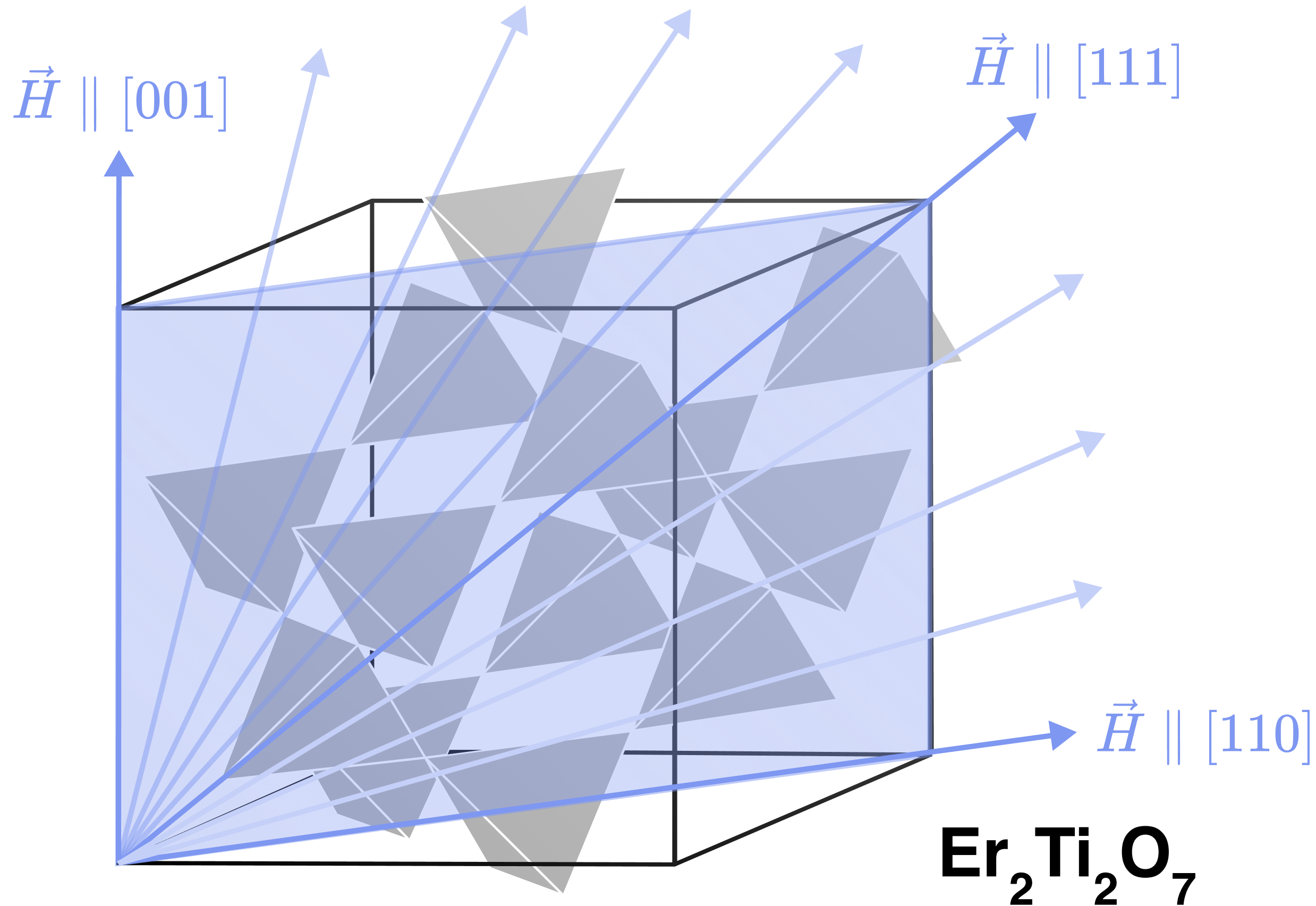
цель работы

- ИЗУЧИТЬ **однородную моду спиновых колебаний** методом электронного спинового резонанса **на частотах порядка величины щели** (~ 10 ГГц)



цель работы

- изучить **однородную моду спиновых колебаний** методом электронного спинового резонанса **на частотах порядка величины щели (~ 10 ГГц)**
- создать **устройство для вращения образца**



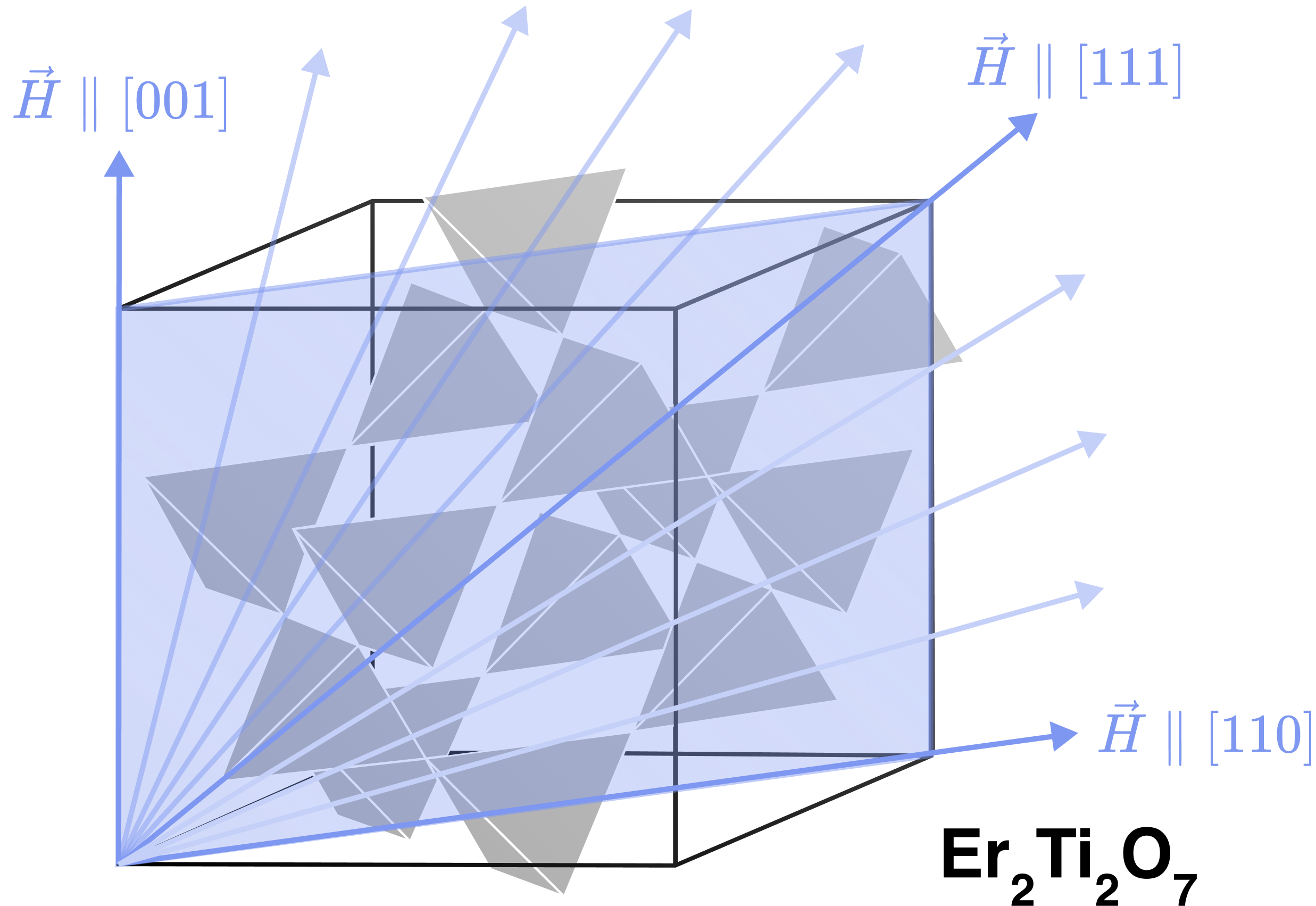
цель работы

- ИЗУЧИТЬ **однородную моду спиновых колебаний** методом электронного спинового резонанса **на частотах порядка величины щели (~ 10 ГГц)**

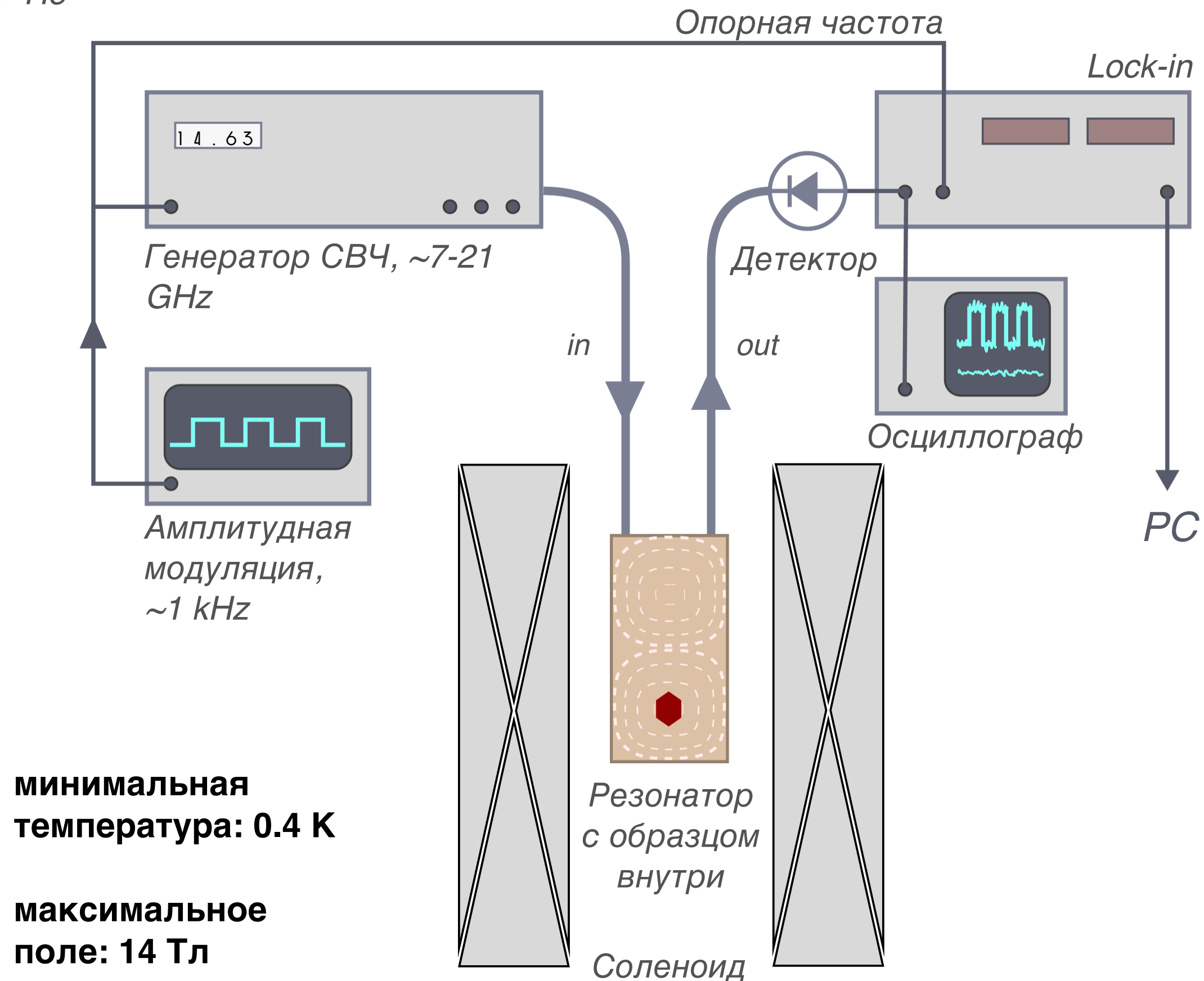
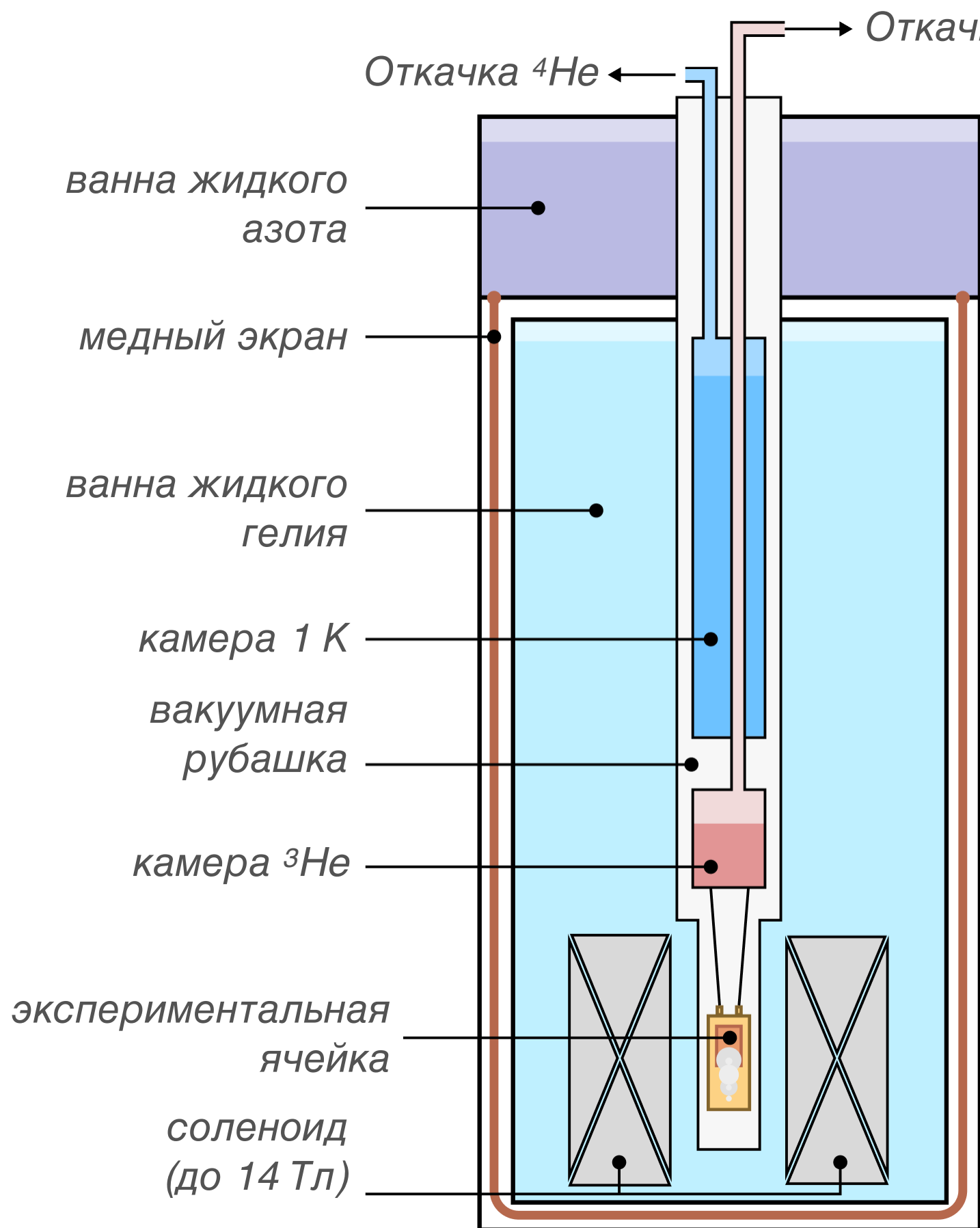
- создать **устройство для вращения образца**



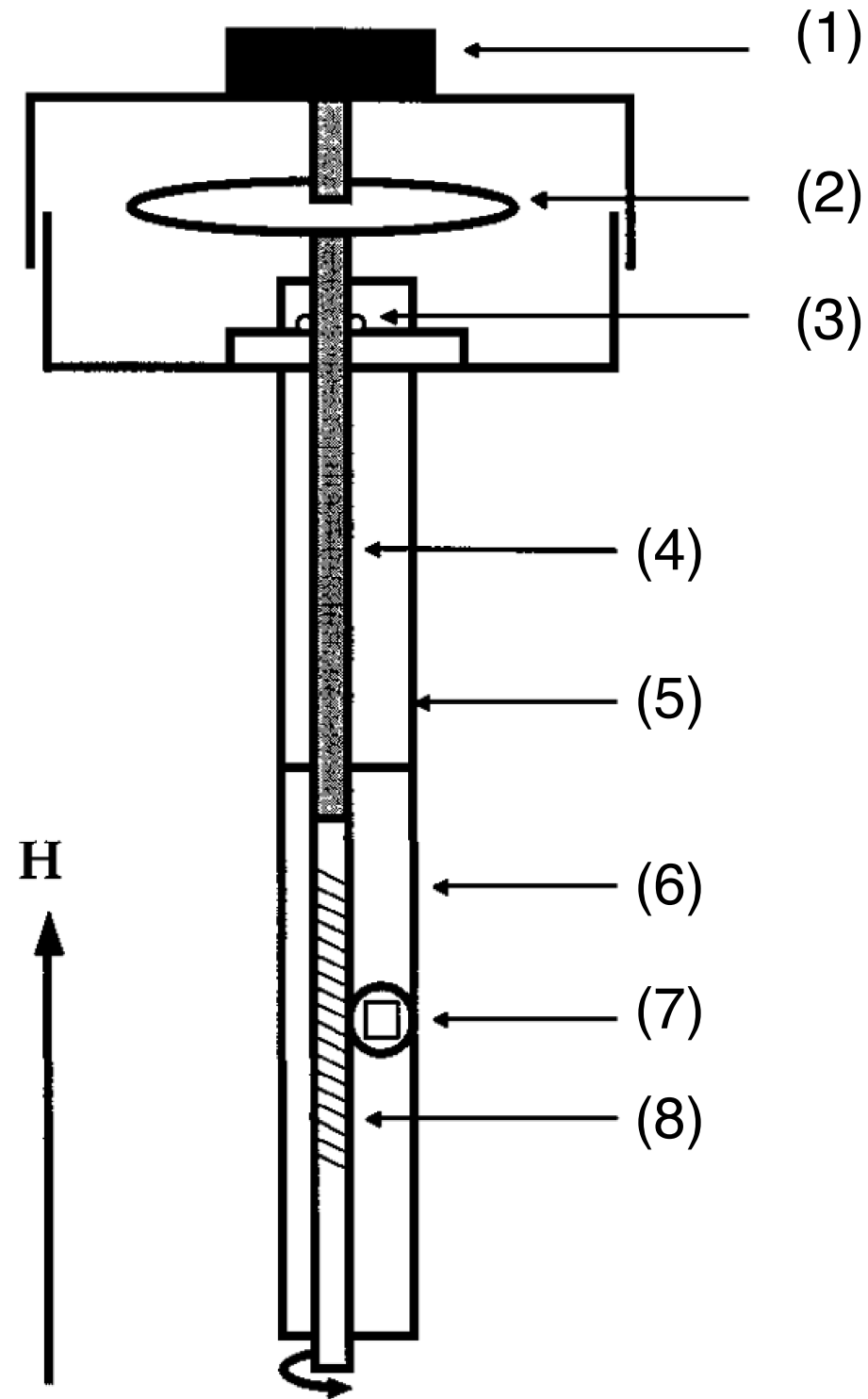
- ИЗУЧИТЬ **угловую зависимость** ЭТОЙ МОДЫ



экспериментальная установка



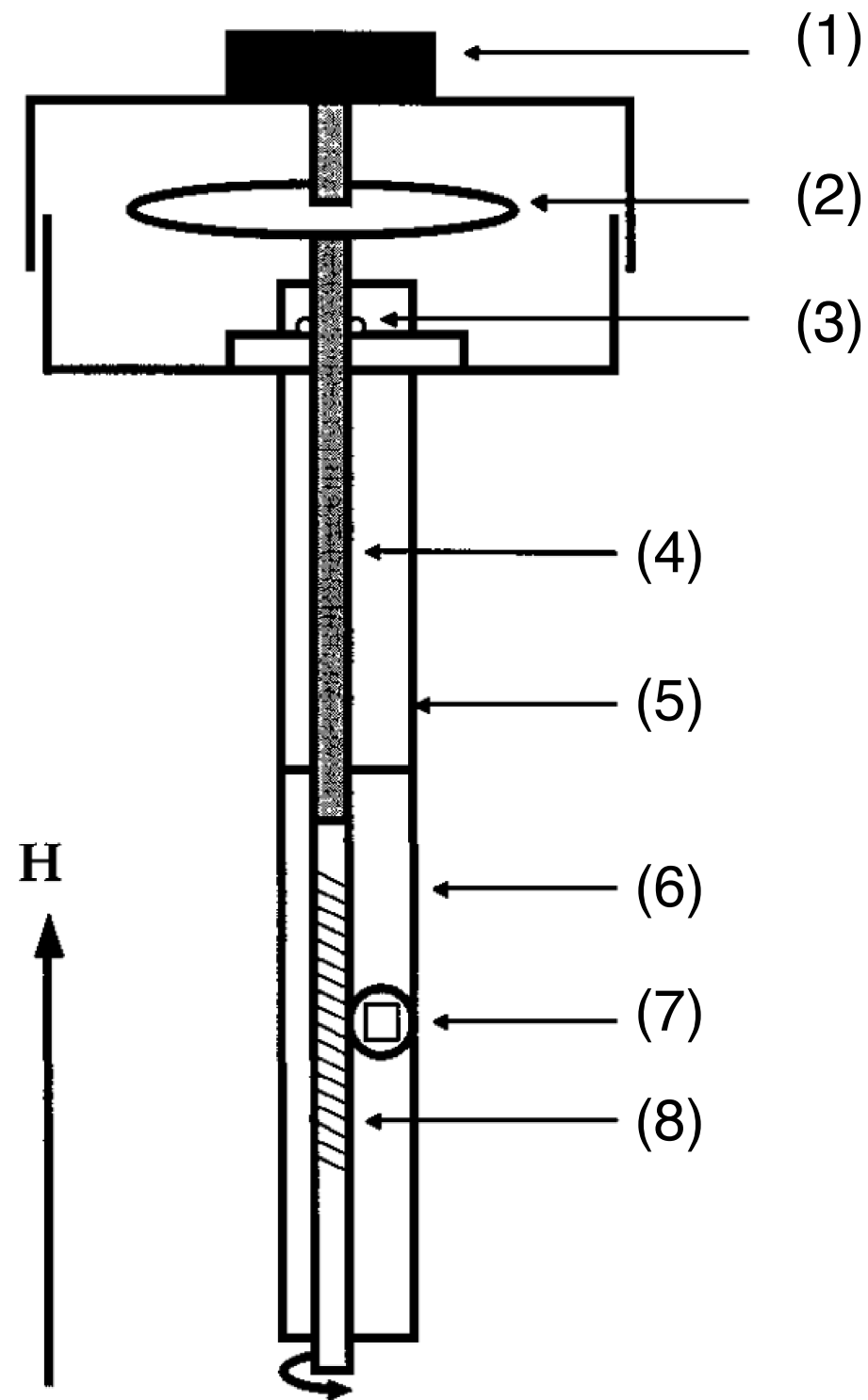
вращение образца



шток с червячной передачей

A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)

вращение образца



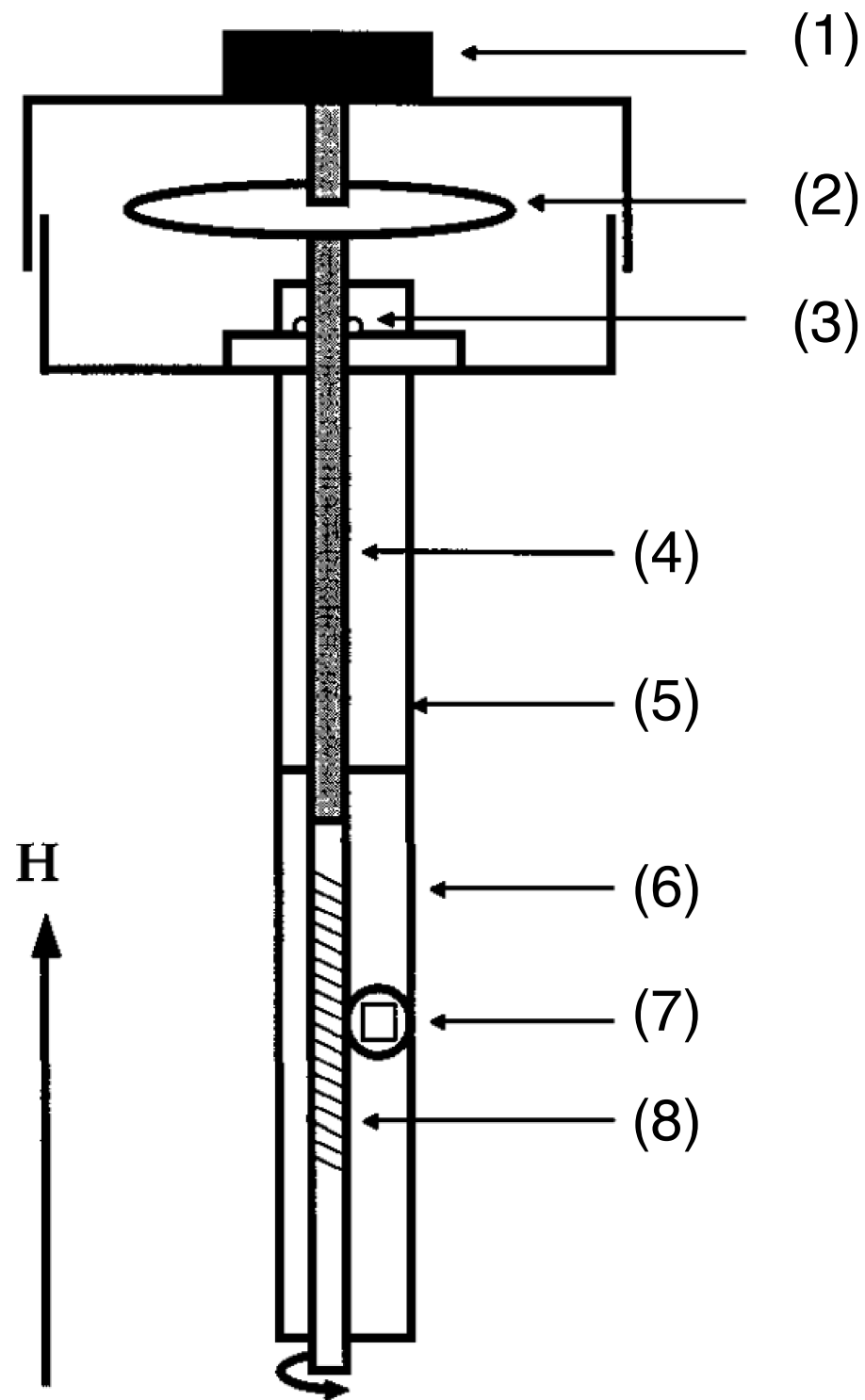
необходимо пропускать длинный шток через весь криостат:

- СЛОЖНО **вакуумировать**
- сильное **трение**
- пропускание штока **может быть несовместимо с конструкцией криостата**

шток с червячной передачей

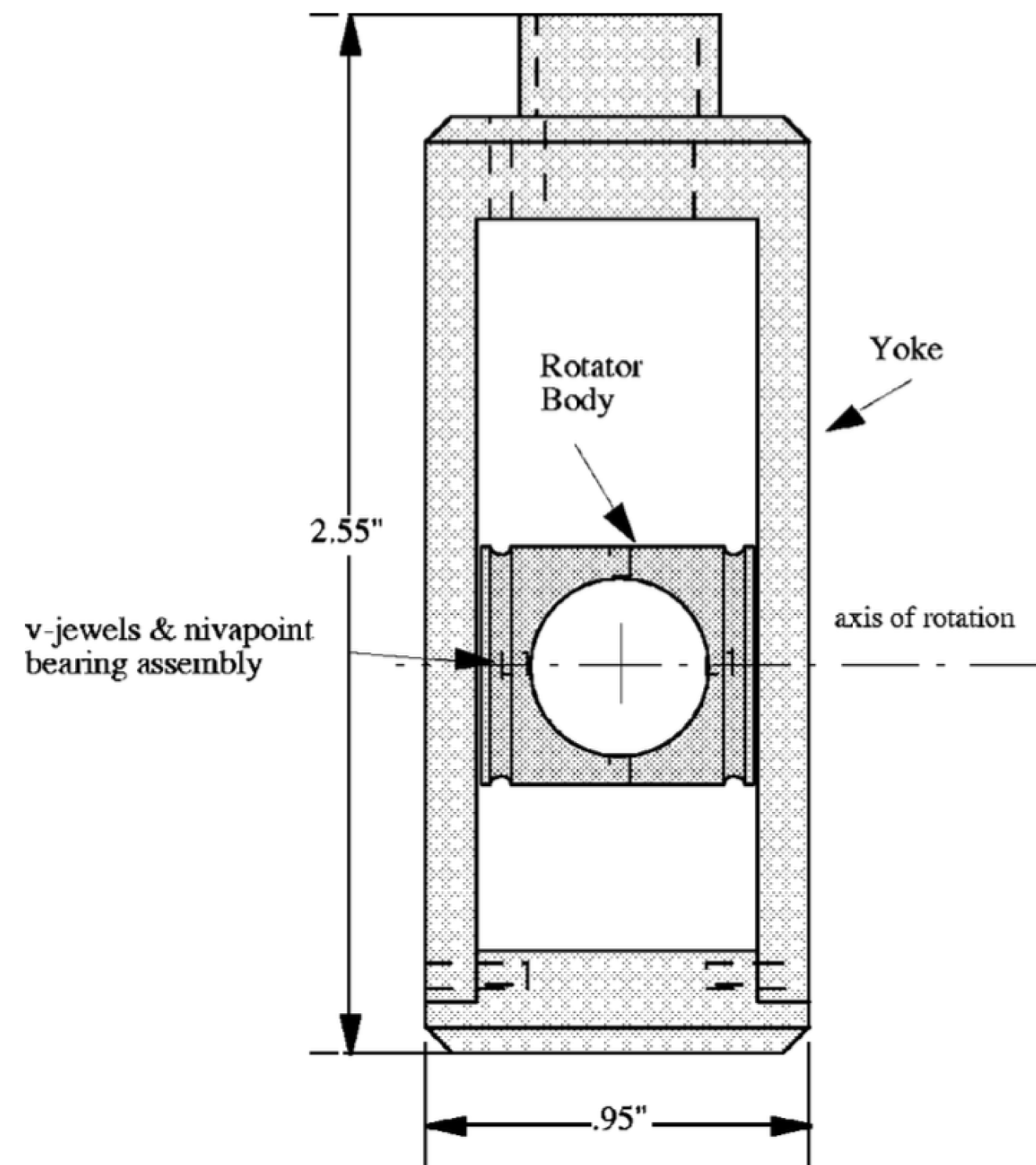
A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)

вращение образца



ШТОК С ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)



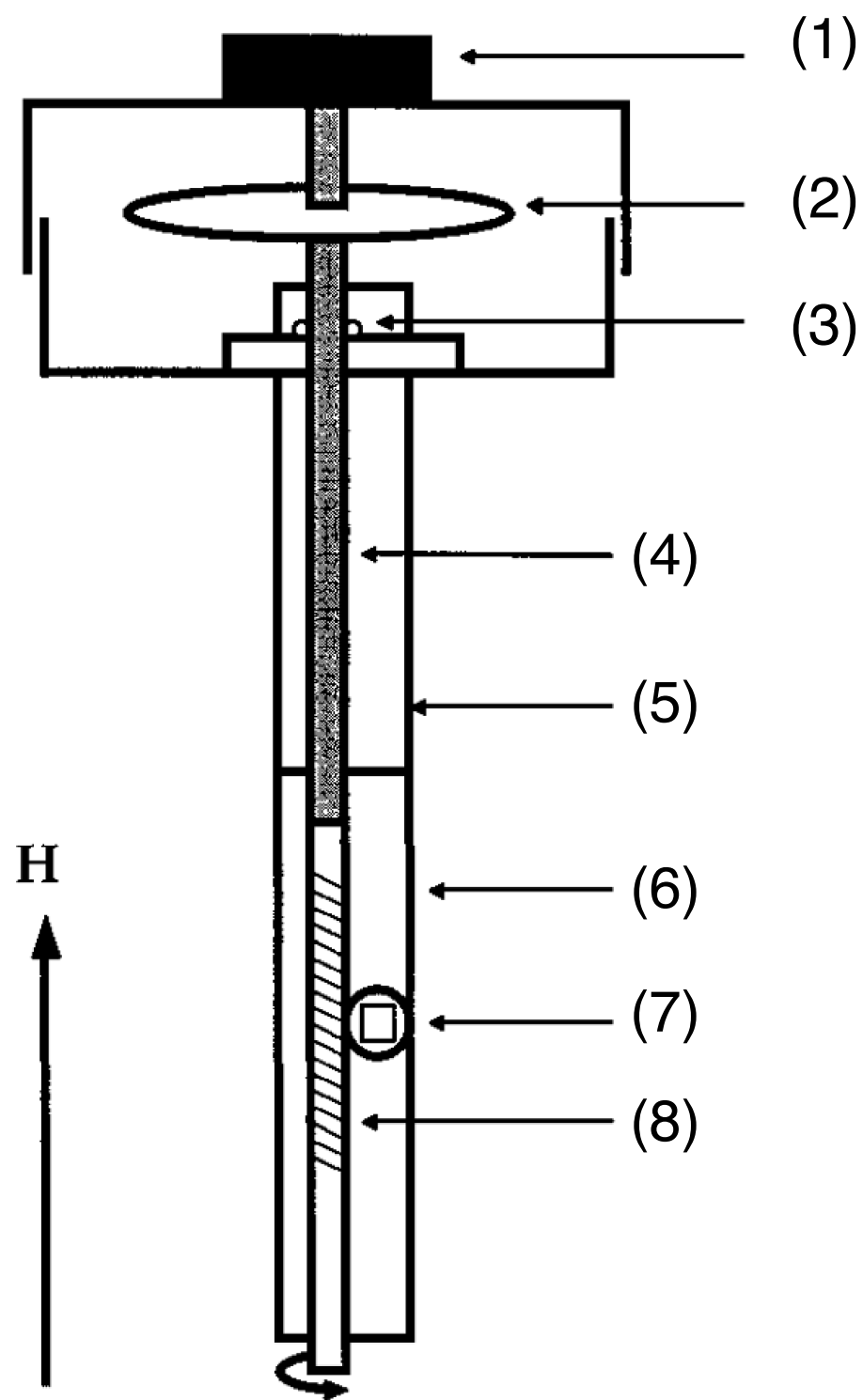
ШКИВ С КЕВЛАРОВЫМИ НИТЯМИ

E. C. Palm et al., Rev. Sci. Instrum. (1999)

не такое сильное трение, но

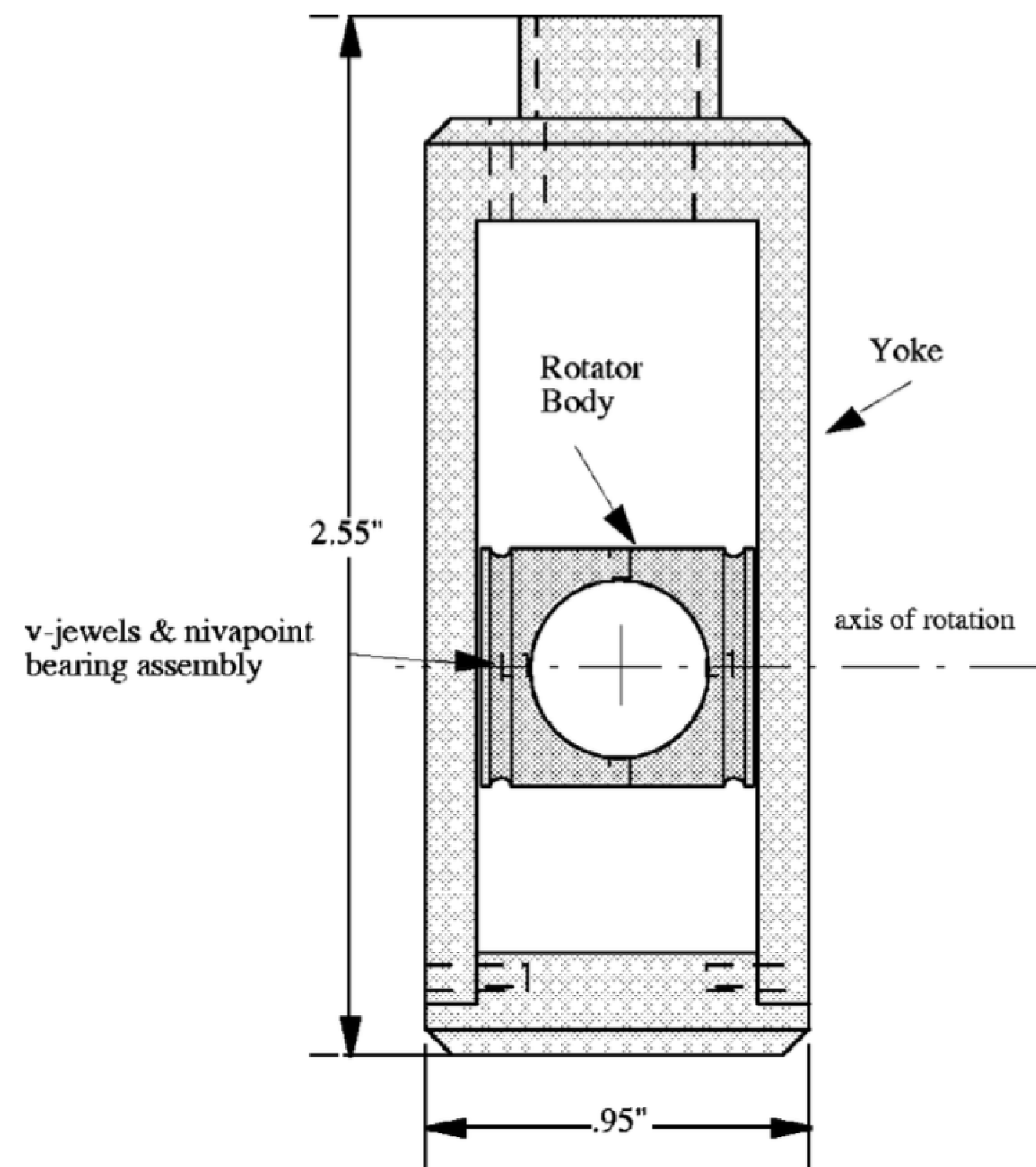
- **всё ещё необходимо пропускать длинный шток через криостат**
- **если в конструкции есть электродвигатель – сломается в сильном магнитном поле**

вращение образца



ШТОК С ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

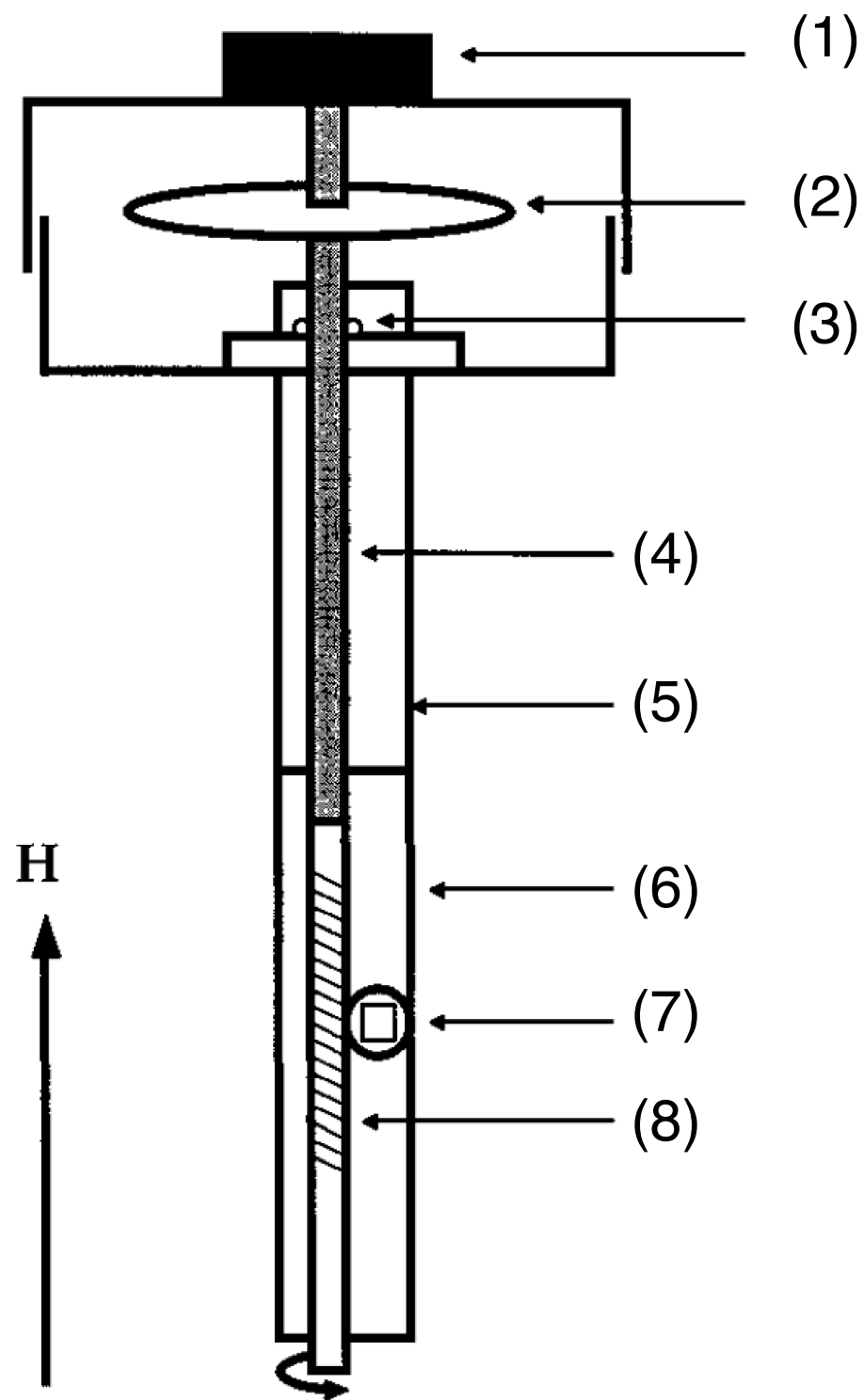
A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)



ШКИВ С КЕВЛАРОВЫМИ НИТЯМИ

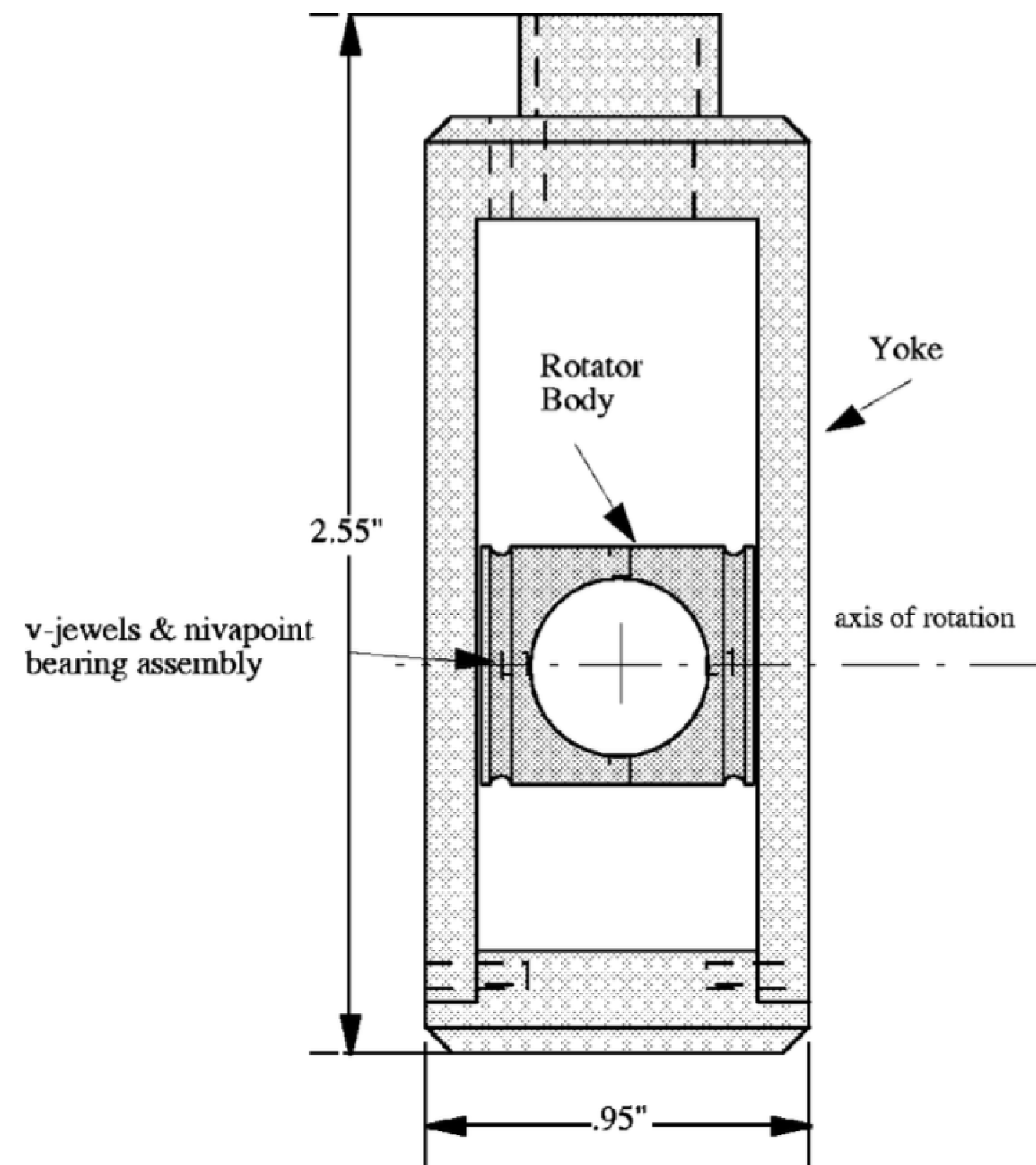
E. C. Palm et al., Rev. Sci. Instrum. (1999)

вращение образца



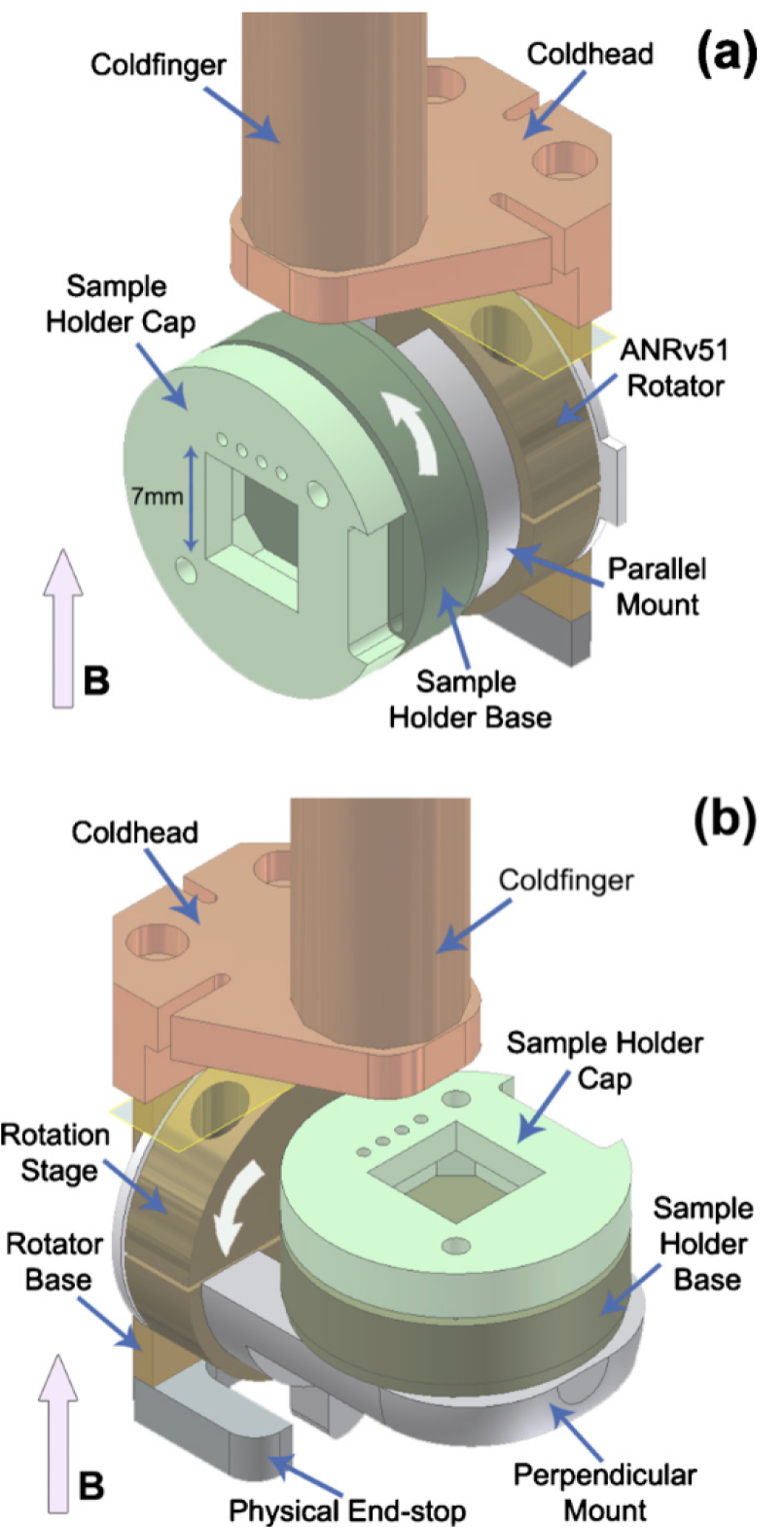
ШТОК С ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)



ШКИВ С КЕВЛАРОВЫМИ НИТЯМИ

E. C. Palm et al., Rev. Sci. Instrum. (1999)

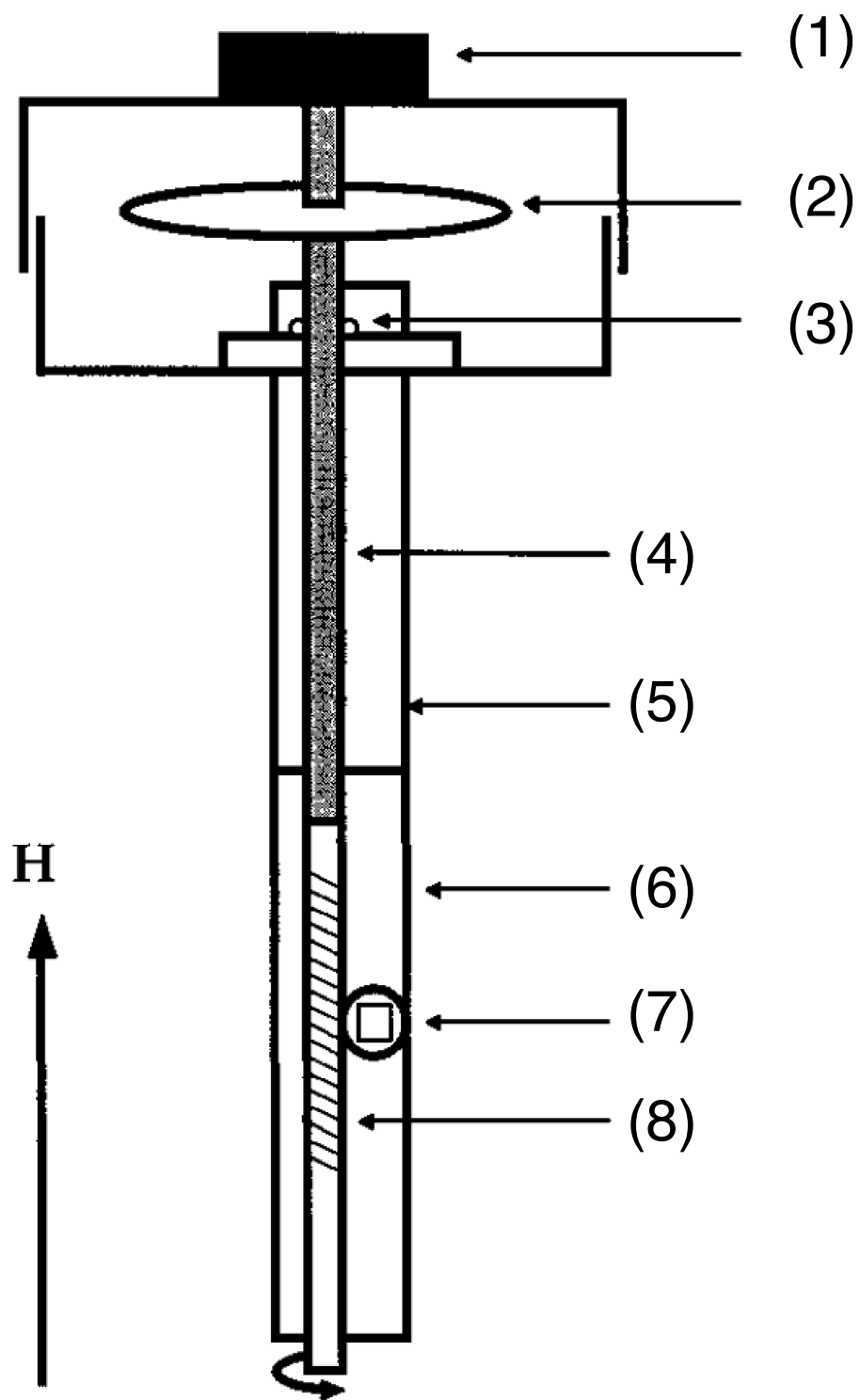


ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАТЕЛИ

L. A. Yeoh et al., Rev. Sci. Instrum. (2010)

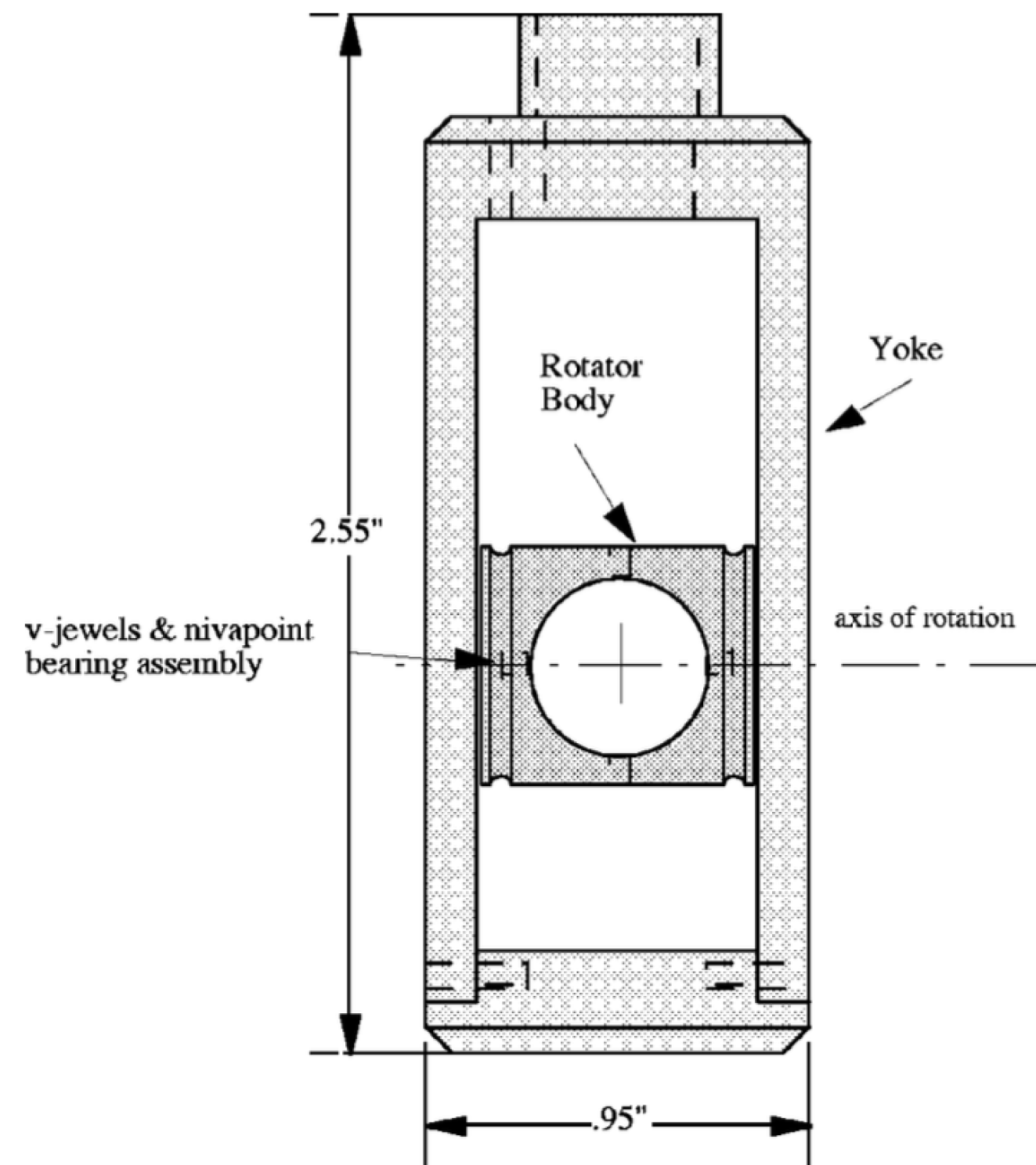
вращение образца

дорогие (((



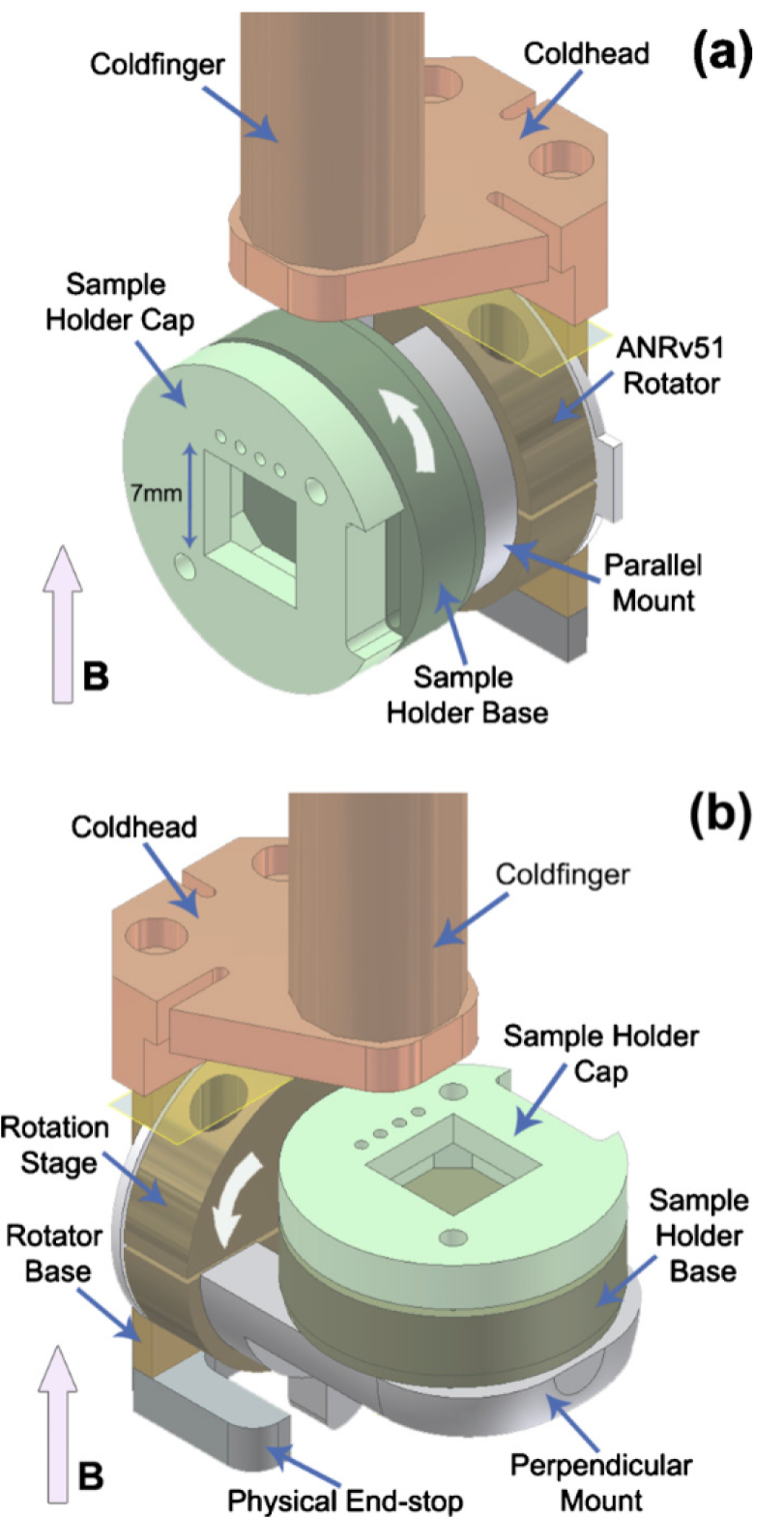
ШТОК С ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

A. Bhattacharya et al., Rev. Sci. Instrum. (1998)

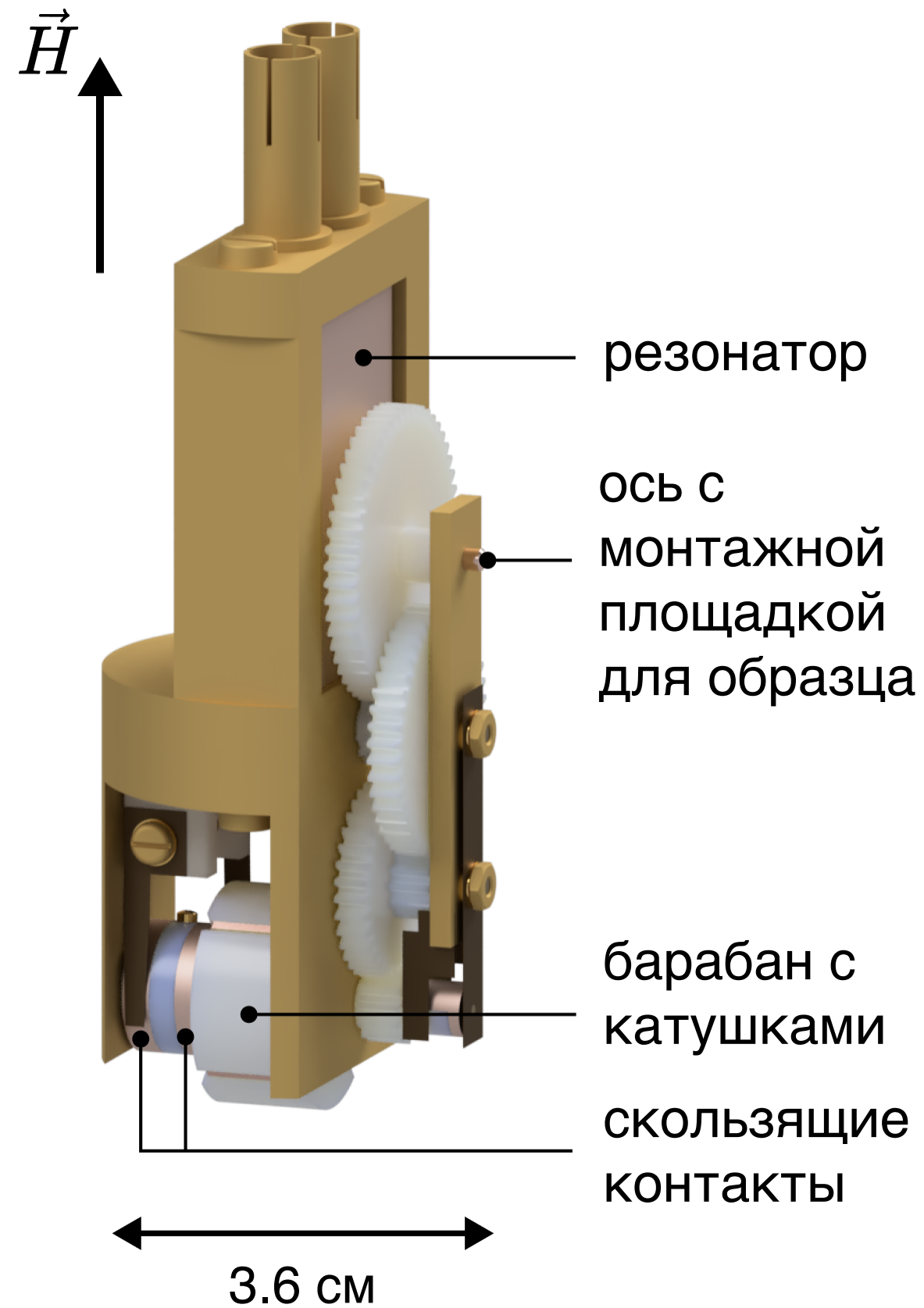


ШКИВ С КЕВЛАРОВЫМИ НИТЯМИ

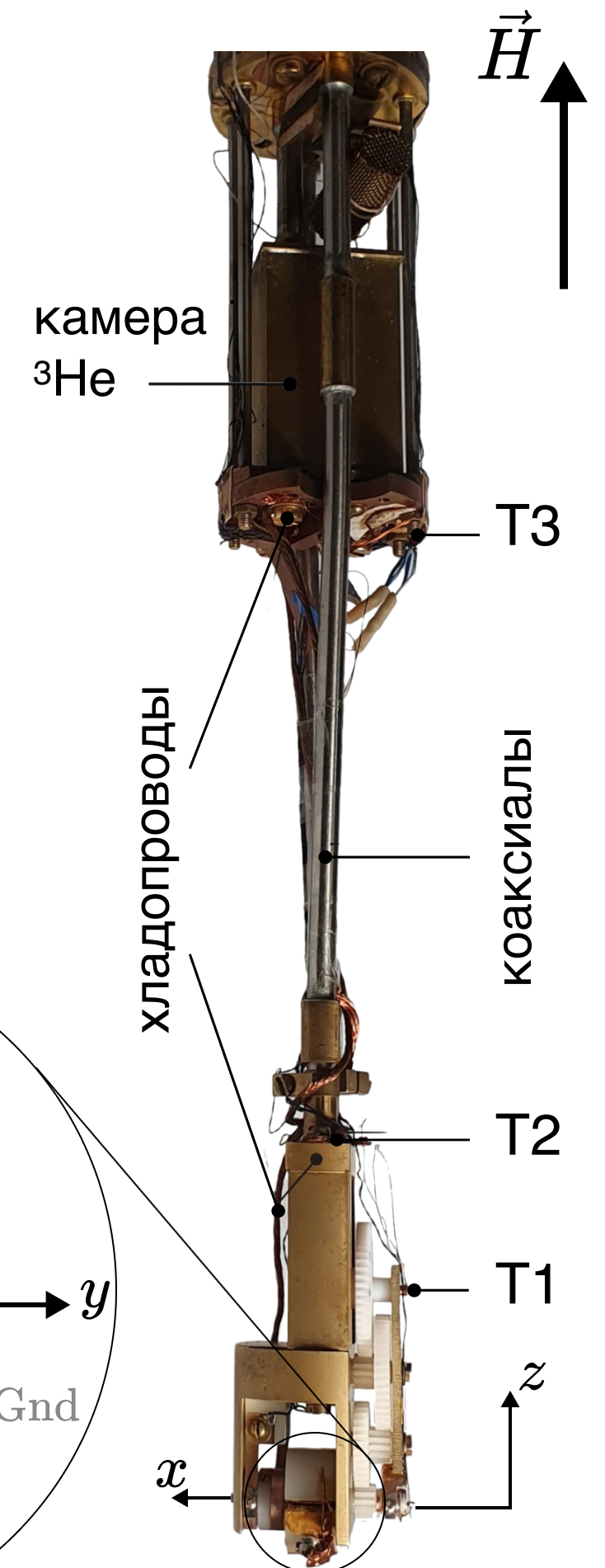
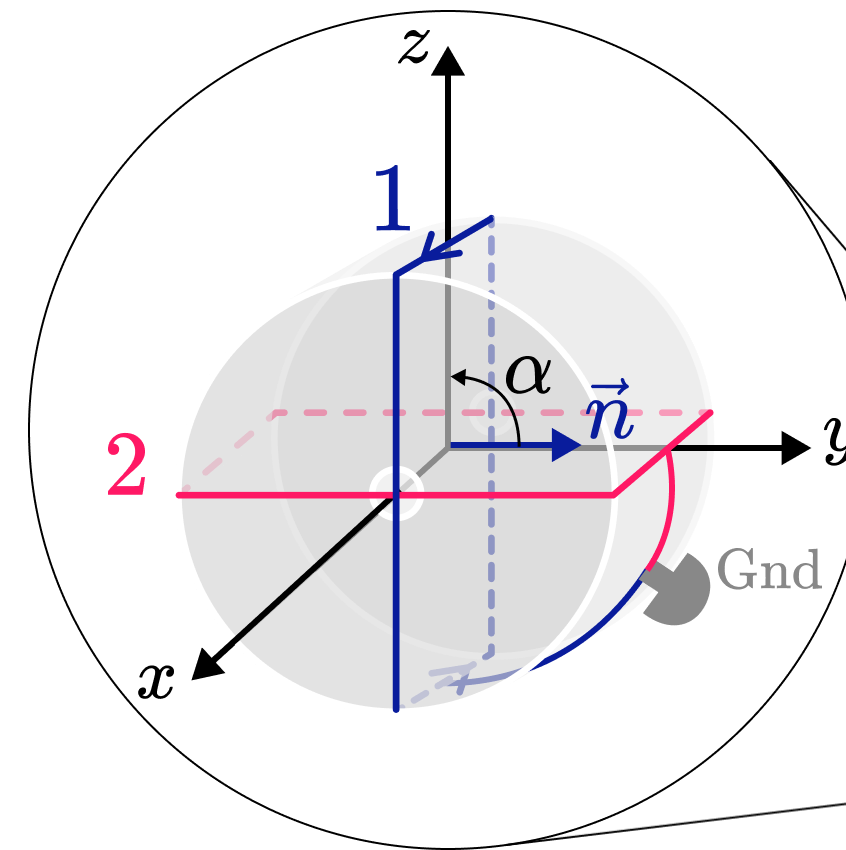
E. C. Palm et al., Rev. Sci. Instrum. (1999)



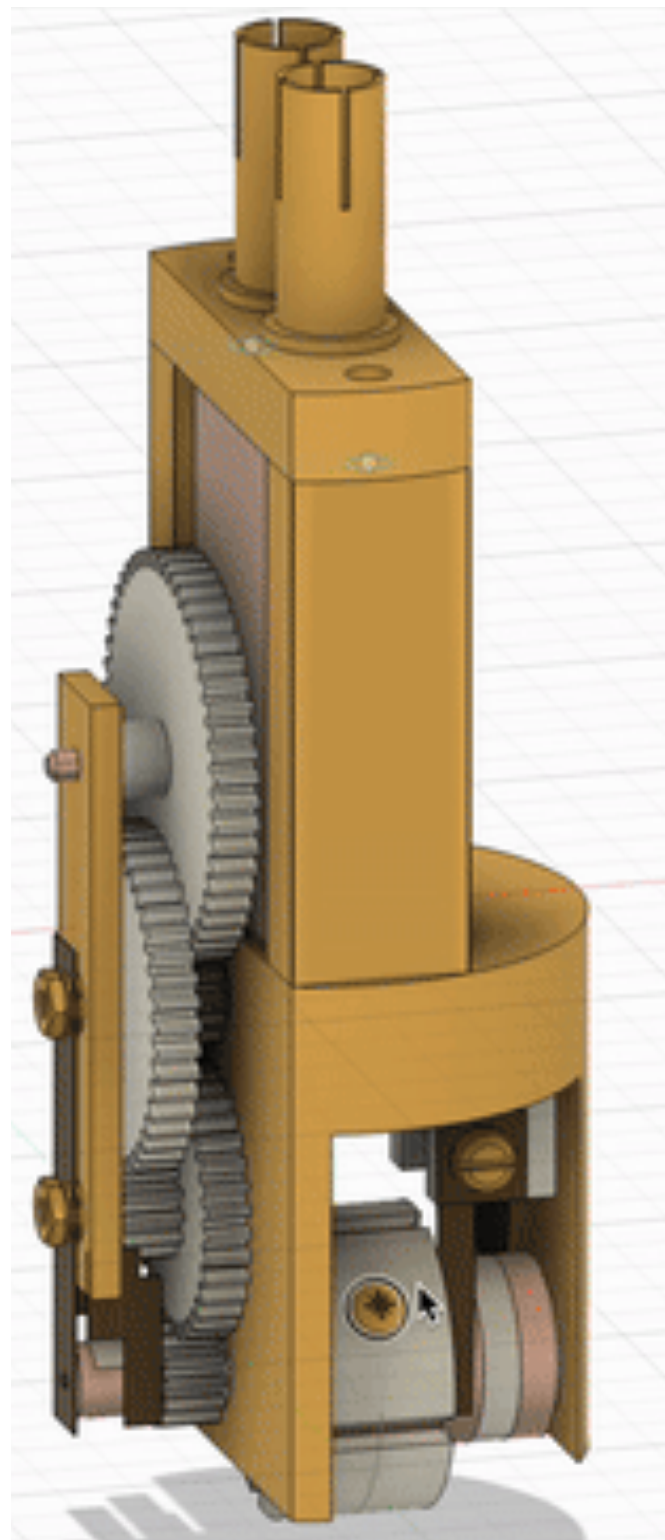
решение есть!



- Статор – **сверхпроводящий соленоид криостата**
- Ротор – **барабан из полиацетала со скрещенными медными катушками**



принцип работы вращателя

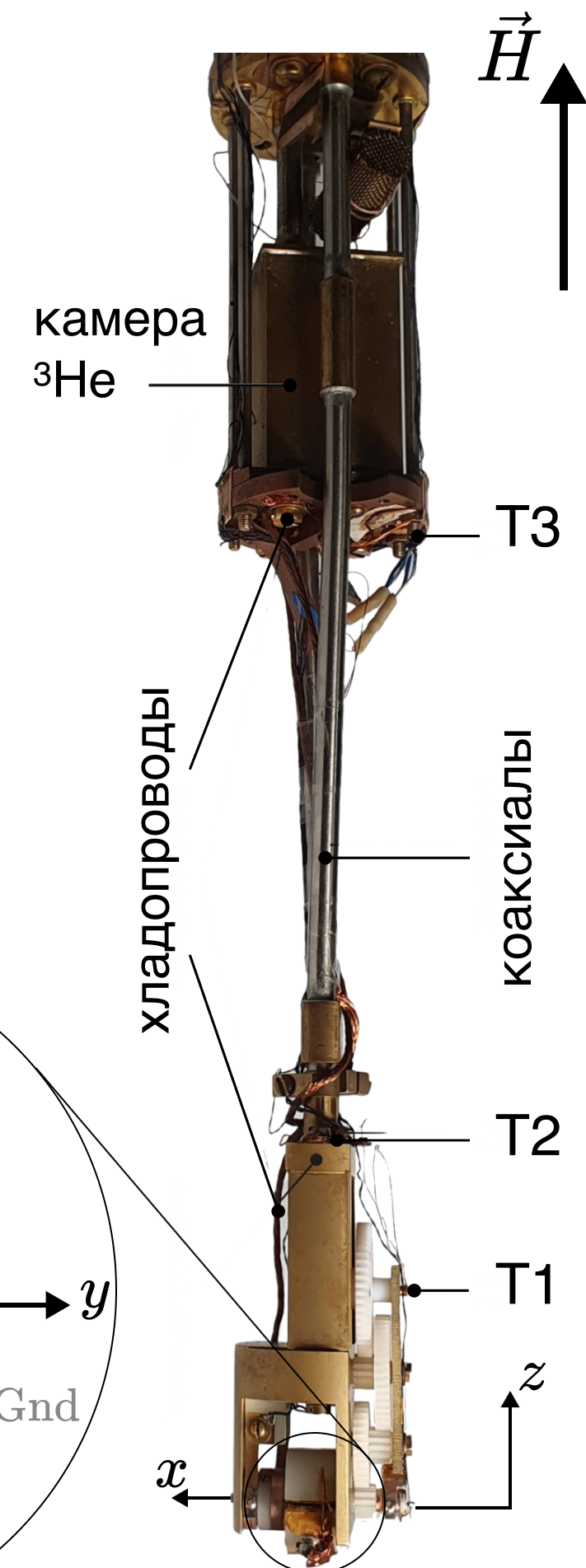
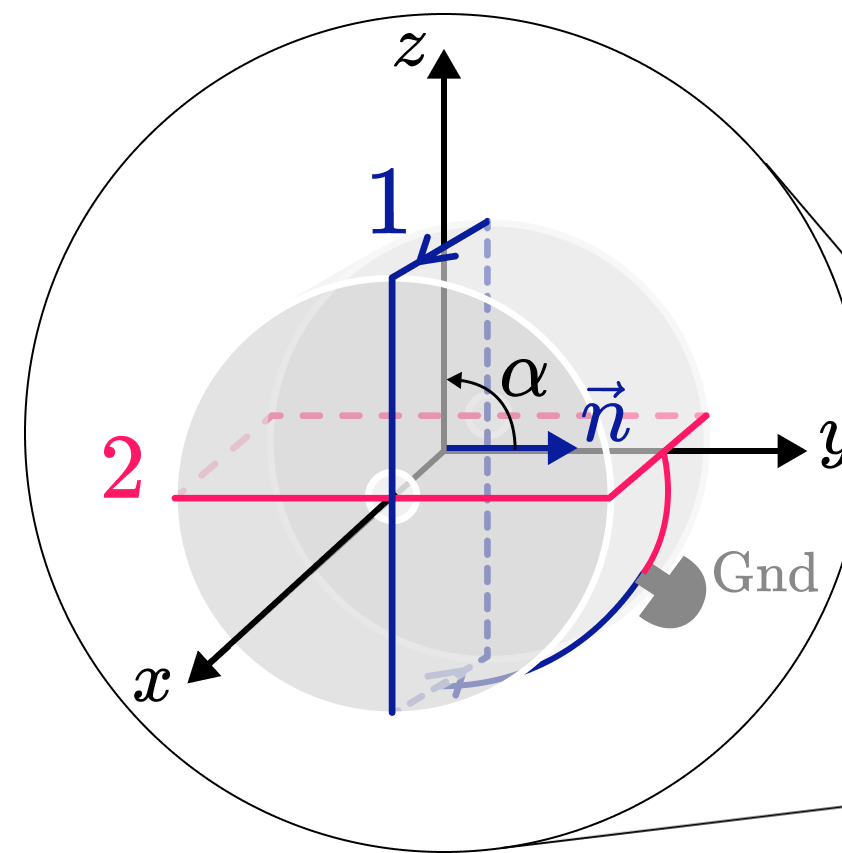


- При пропускании через скользящие контакты и общий контакт на оси вращения **постоянного тока нужной полярности** в катушках поочередно возникает **крутящий момент**, вызывающий **поворот барабана на 90°**

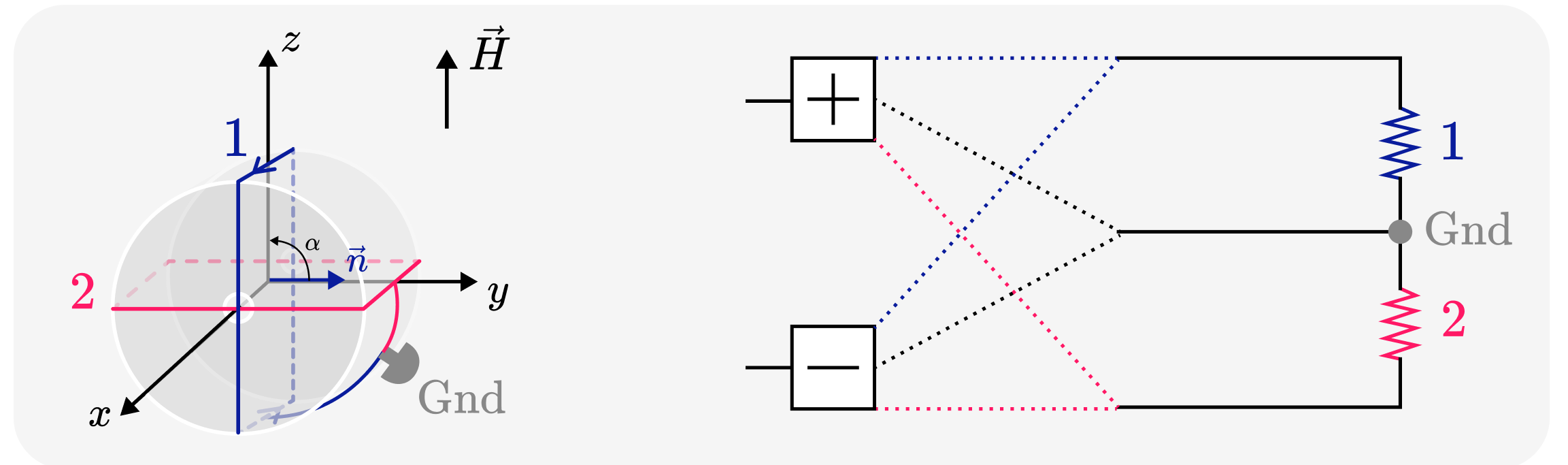
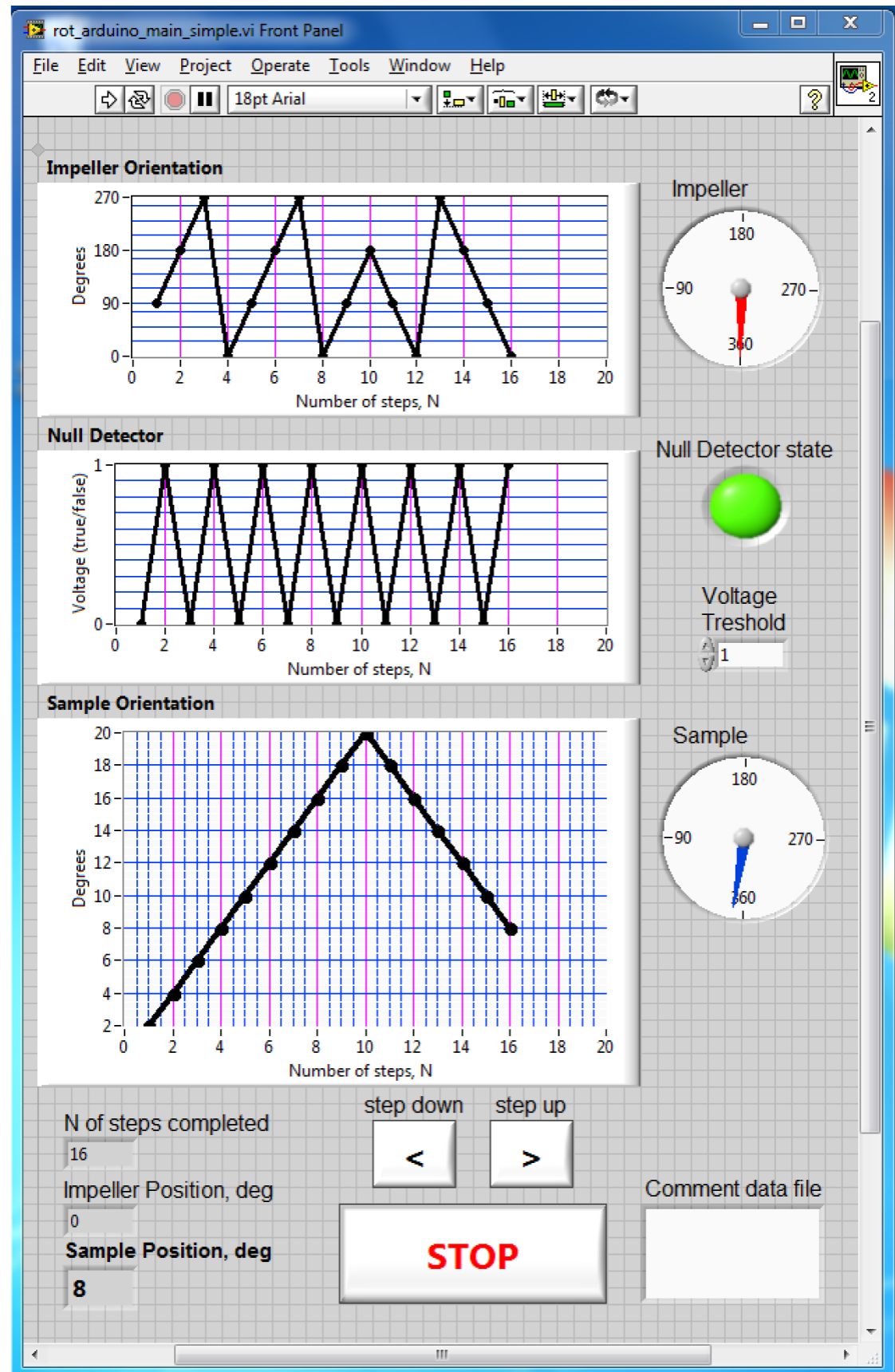
$$\vec{\mu} = ISN\vec{n}$$

$$\vec{T} = [\vec{\mu} \times B]$$

- Один поворот ведущего колеса на 90° = поворот образца на 2°

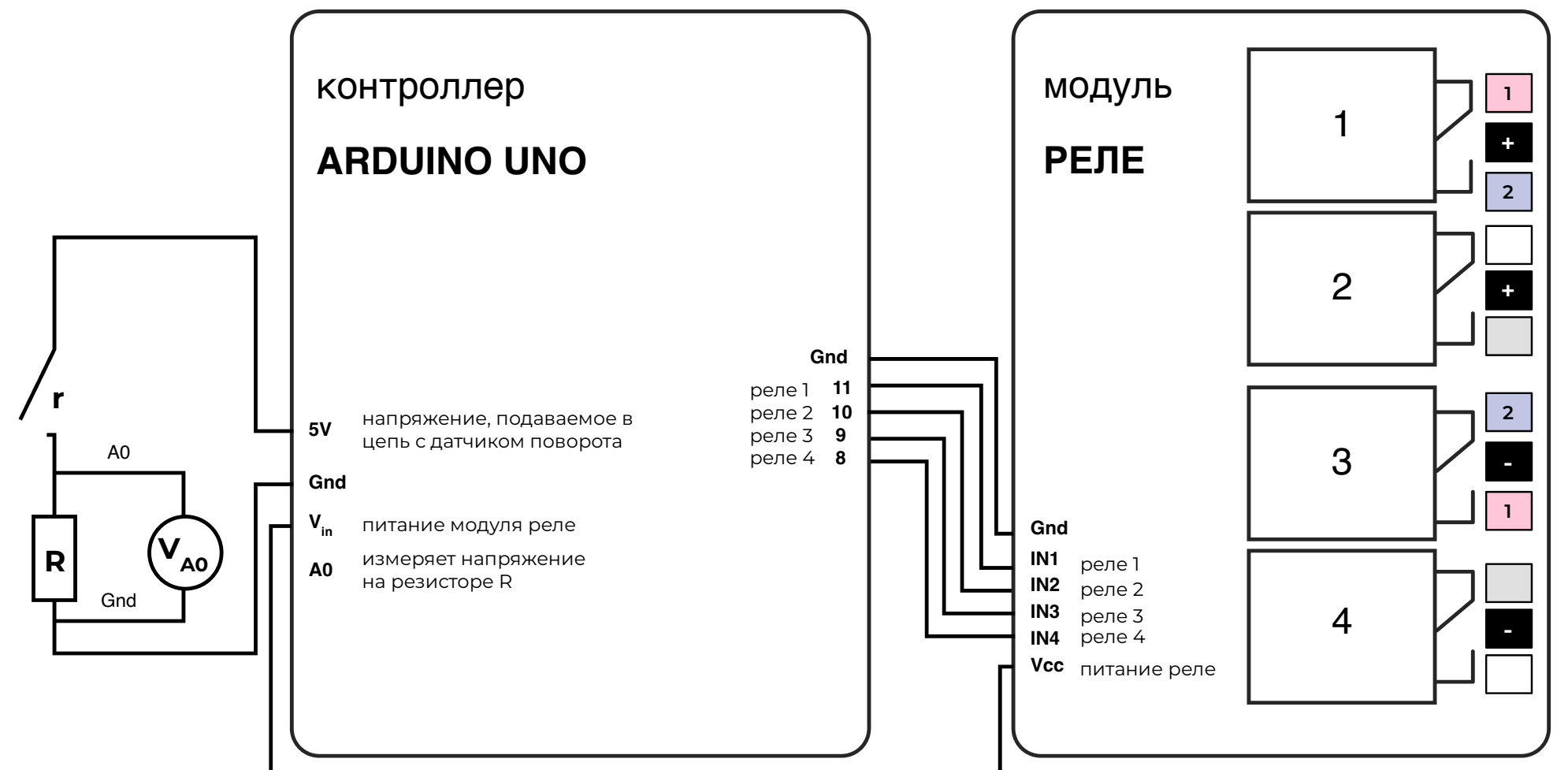


система управления

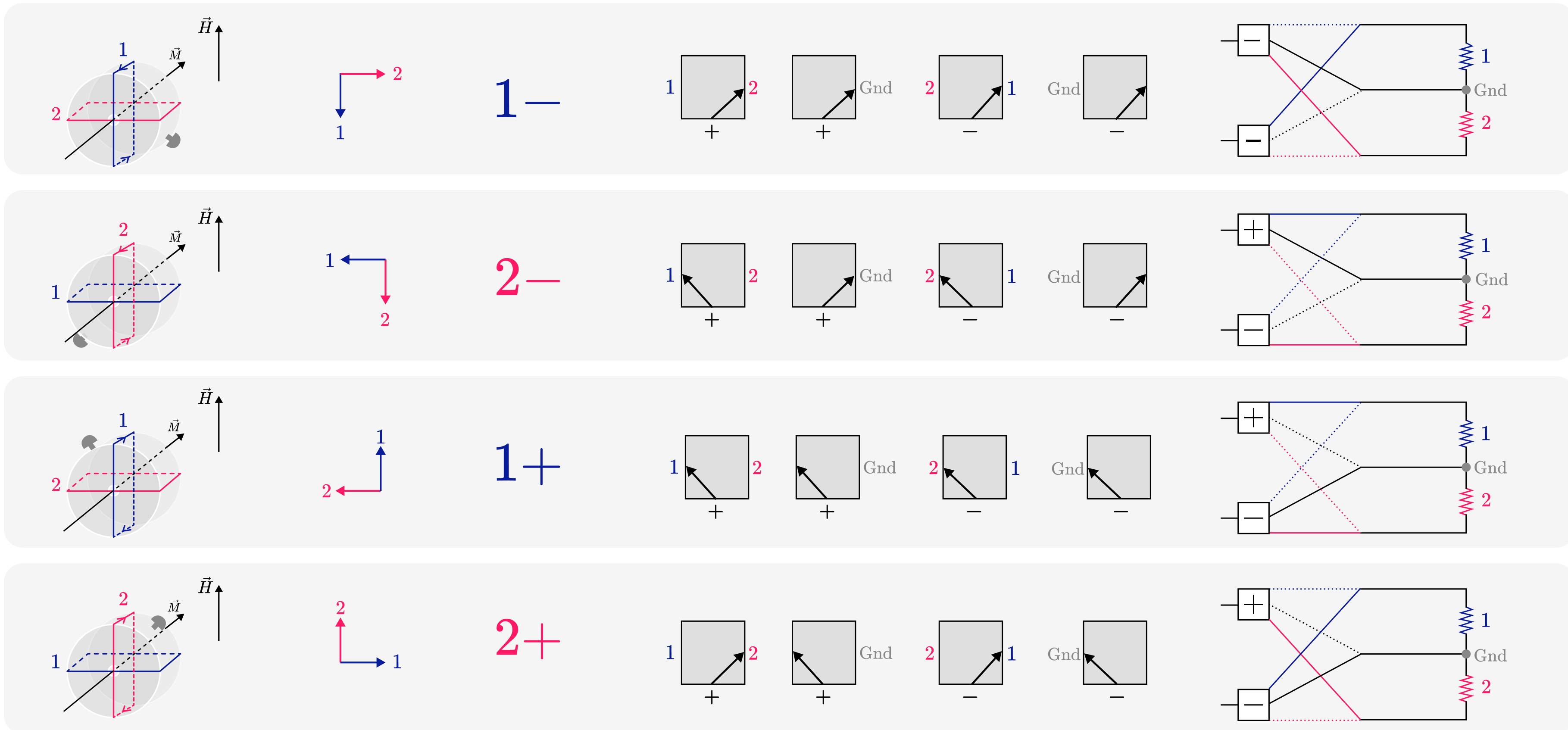


датчик поворота,
 $r = 44 \text{ Ом}$

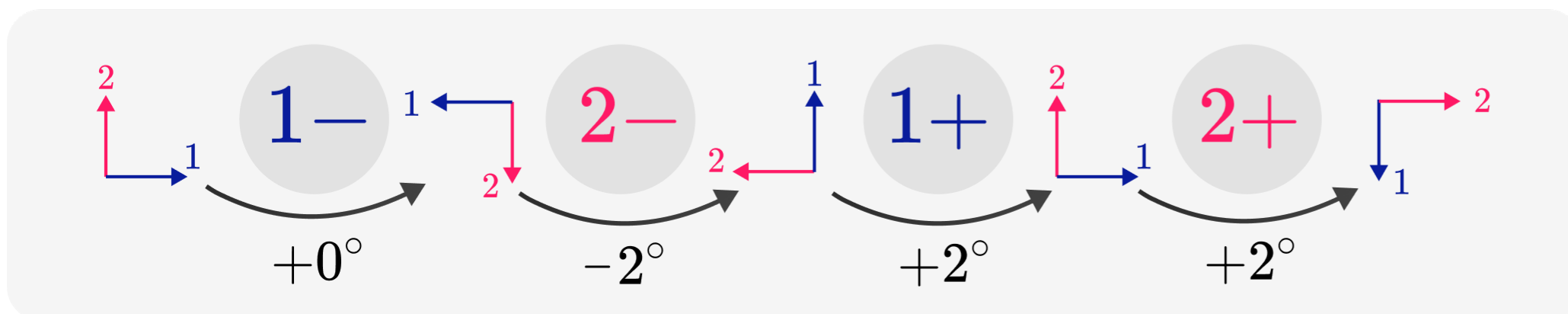
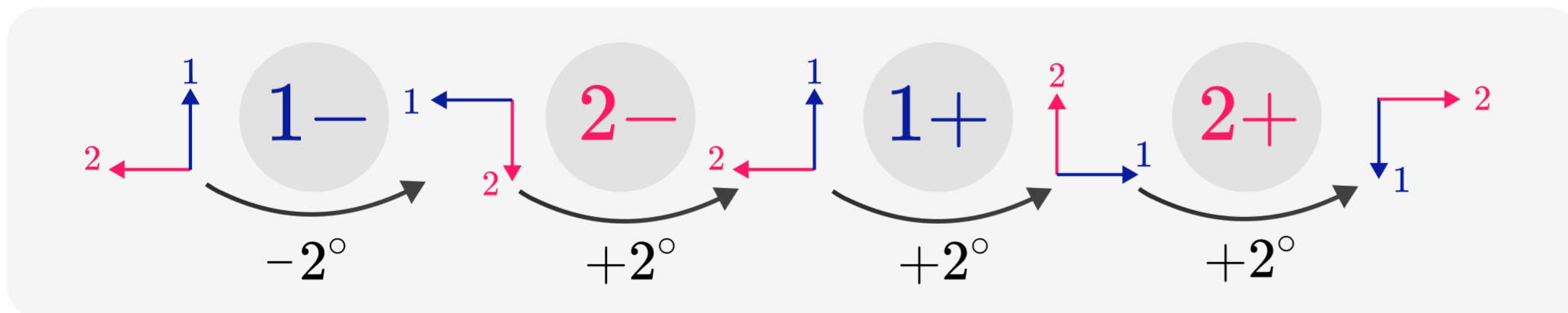
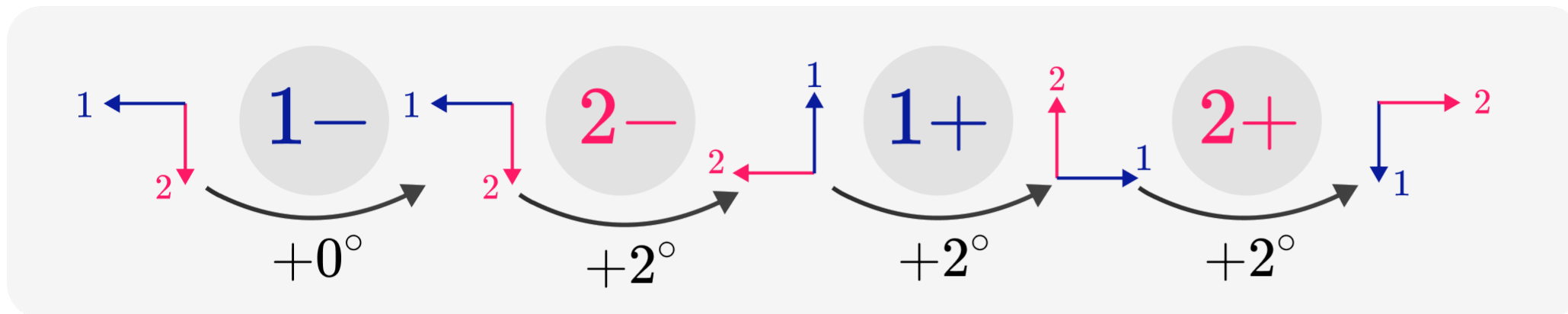
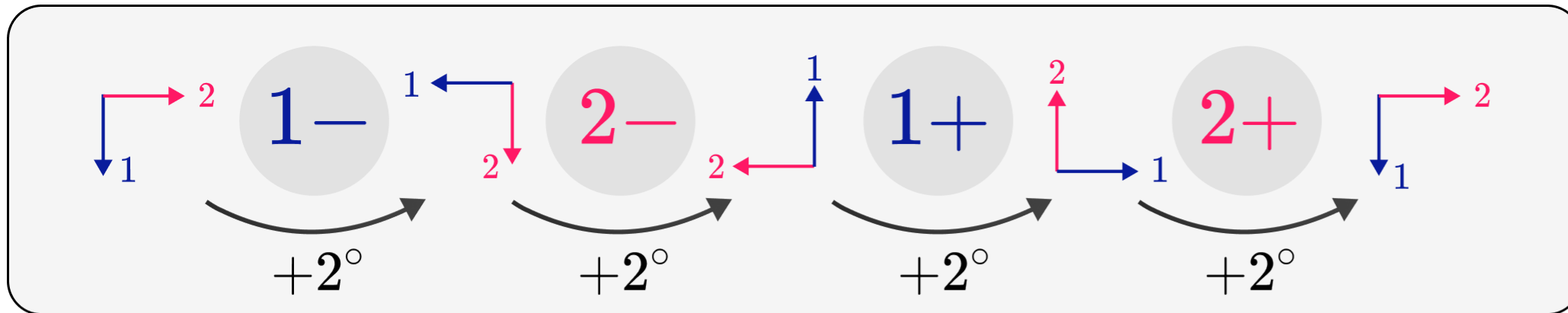
резистор,
 $R = 50 \text{ кОм}$



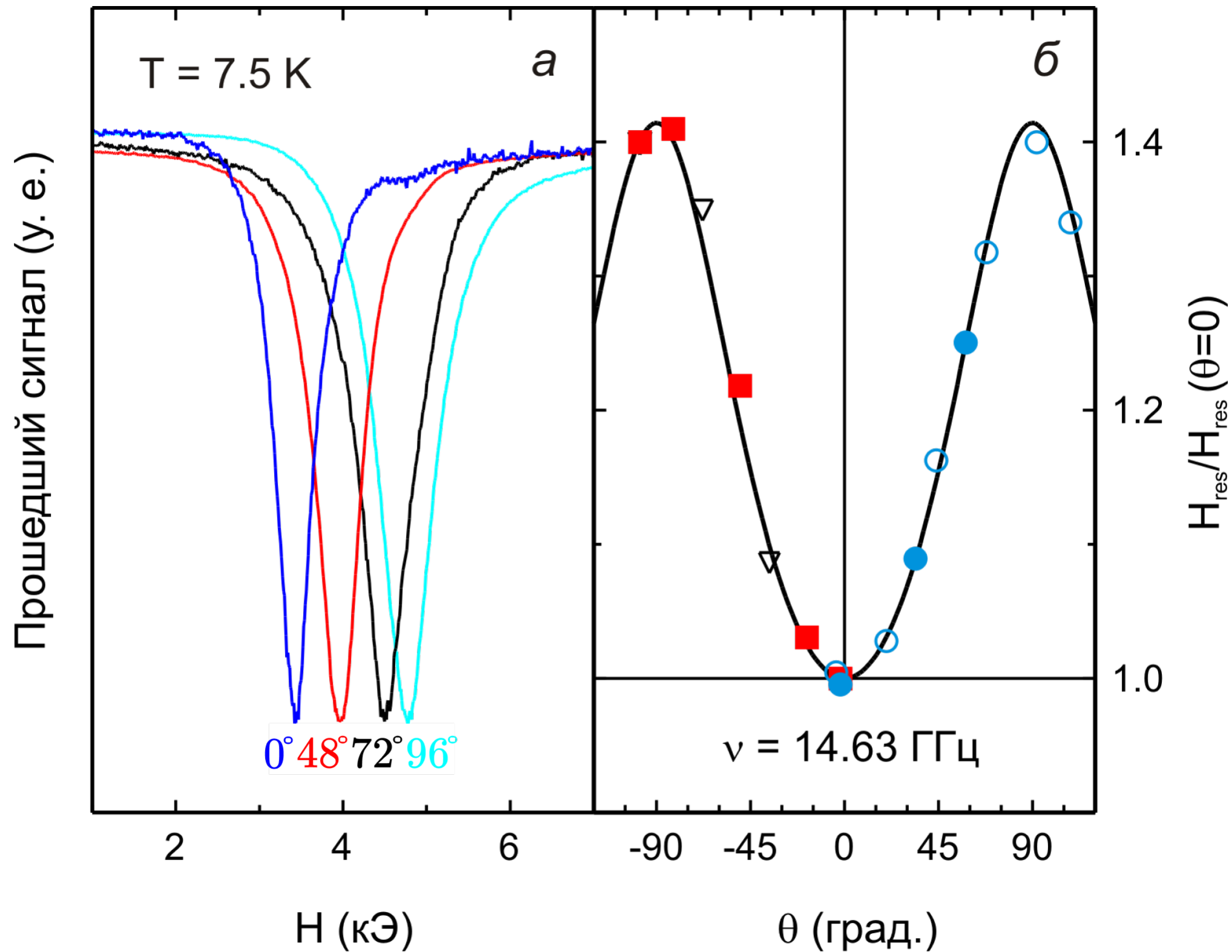
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСОВ



ВОССТАНОВЛЕНИЕ



тестирование: MnCO_3



- Воспроизведены угловые зависимости MnCO_3

$$\nu = \Delta^2 + \gamma H_{\perp} (H_{\perp} + H_D)$$

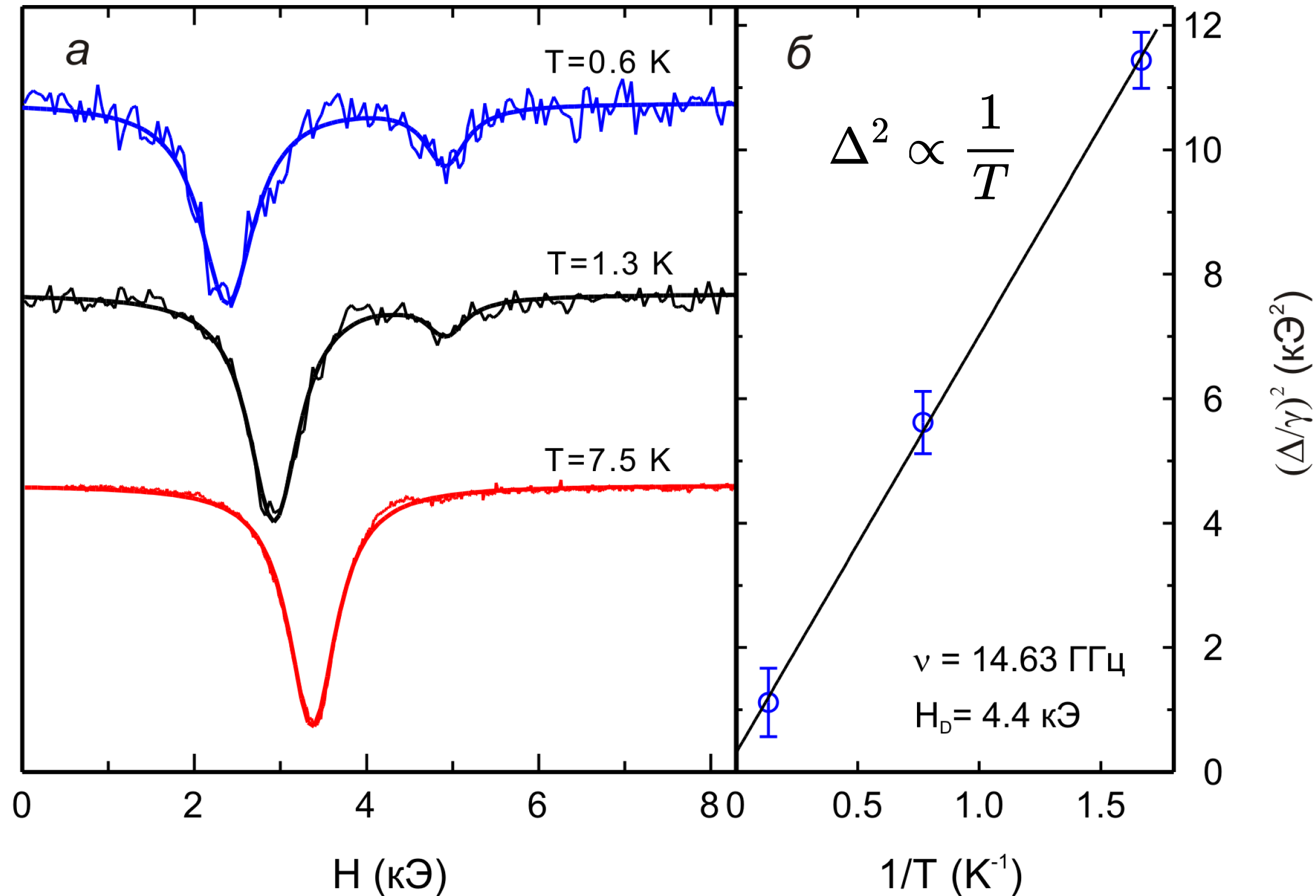
- Образец приклеивался на плоскость, направленную под углом $\varphi = 45^\circ$ к оси \mathbf{C}_3
- При вращении площадки на угол θ проекция поля \mathbf{H} на плоскость, перпендикулярную оси \mathbf{C}_3 , есть

$$H_{\perp} = H \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}$$

- При фиксированной частоте ν положение линии поглощения во внешнем поле H_{res} задается условием $H_{\perp} = \text{const}$, поэтому его **угловая зависимость определяется выражением**

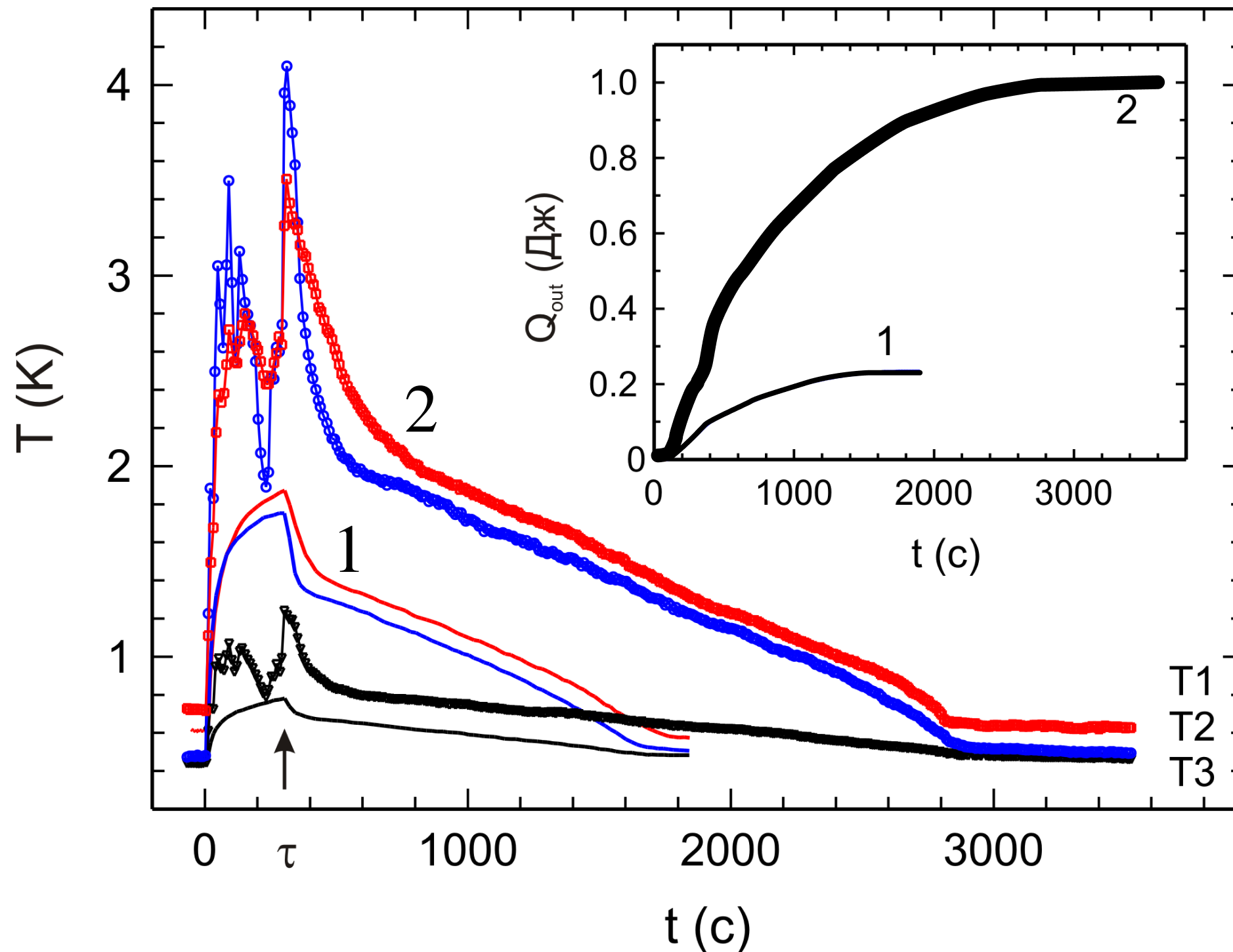
$$H_{res} = \frac{H_{res}(\theta = 0)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}}$$

тестирование: MnCO_3



- Известная **зависимость $\Delta^2(1/T)$ - независимый контроль температуры** образца в ходе эксперимента
- Таким образом, **устройство пригодно для использования в экспериментах с вращением образца** при температурах откачки паров жидкого ^3He при наличии в установке источника сильного внешнего магнитного поля

оценка теплопритока



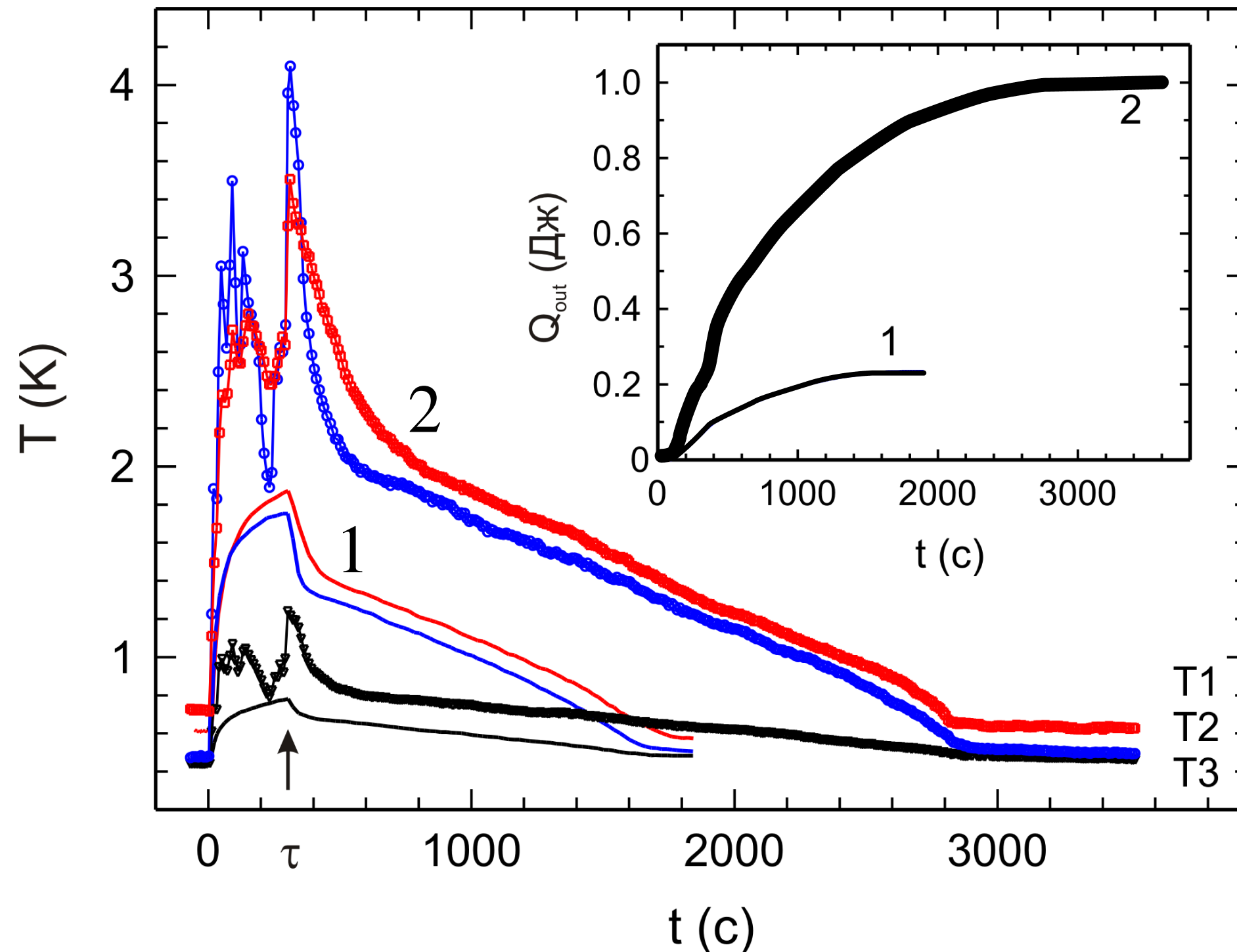
- **1 - пропускание тока 150 мА в нулевом поле в течение $\tau = 300$ с без вращения барабана, затем охлаждение до базовой температуры**
- полное тепловыделение:

$$Q_{in} = i^2 R \tau = 0.22 \text{ Дж}$$
- тепло отводится через медные кабели, теплопроводностью $\kappa = \beta T$

$$Q_{in} = Q_{out} = \frac{\beta}{2} \int_0^{t_f} (T_2^2 - T_3^2) dx$$

МОЖНО ВЫЧИСЛИТЬ, ЧТО $\Rightarrow \beta \simeq 2.8 \cdot 10^{-4}$, Вт/К²
как у неотожженной меди

оценка теплопритока



- **2 - вращение** в течение $\tau = 300$ с на 60° , затем охлаждение до базовой температуры

- тепловыделение при известной β :

$$Q_{out} = \frac{\beta}{2} \int_0^{t_f} (T_2^2 - T_3^2) dx = 1 \text{ Дж}$$

- т.е. ~ 16 мДж на градус поворота

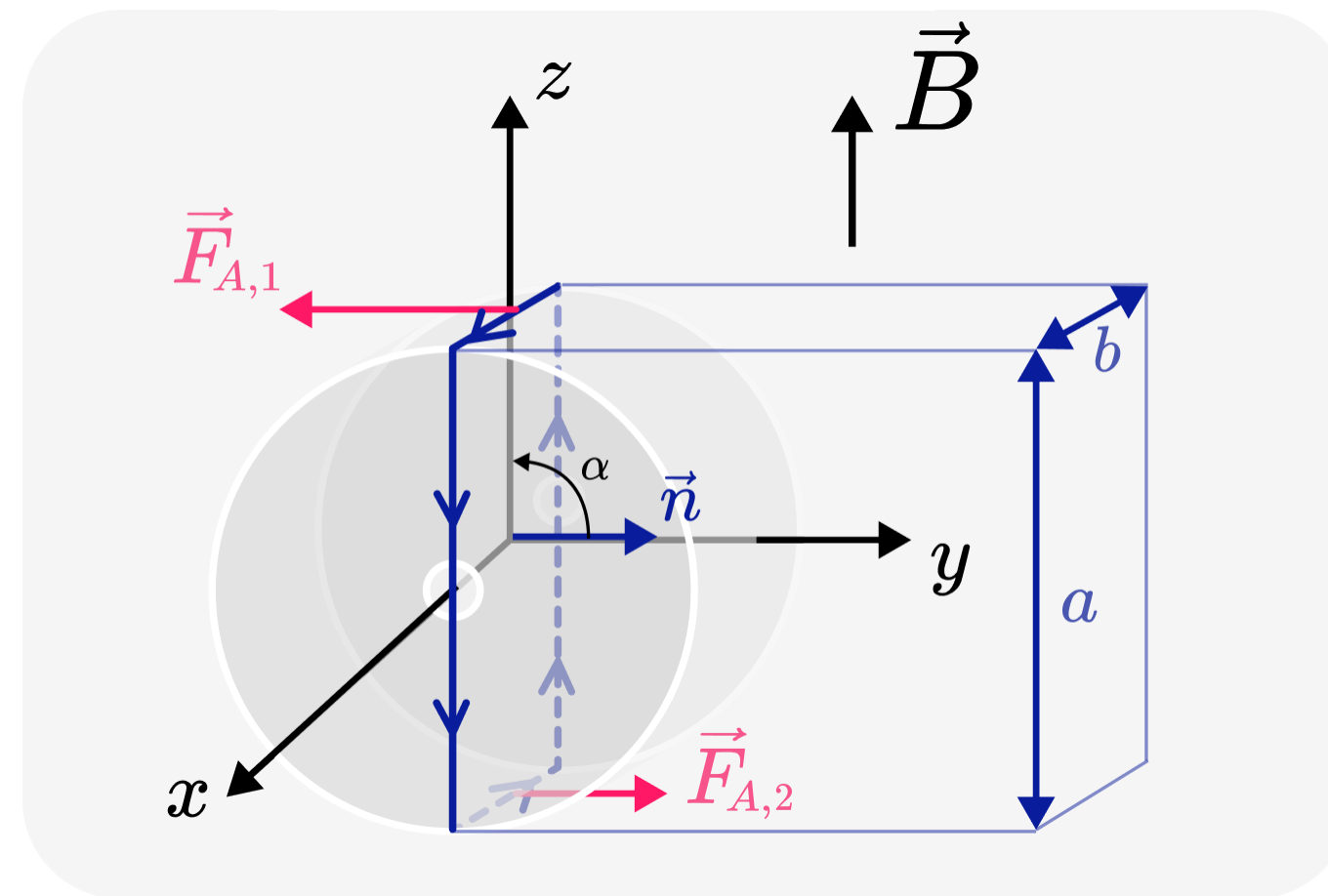
- **но это, видимо, не напрямую связано с процессом вращения!** т.к. работа при единичном повороте

$$A = |T| \Delta\alpha \simeq 1.5 \text{ мДж}$$

**получается, есть какой-то другой
источник тепла....**

неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/cm}^2.$$

$$z = 4 \text{ cm}$$

например нескомпенсированная сила Ампера

$$\vec{F}_{A,1} = IN \left[b \cdot \vec{e}_x \times \vec{B}_1 \right] = IN \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_1 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -INbB_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

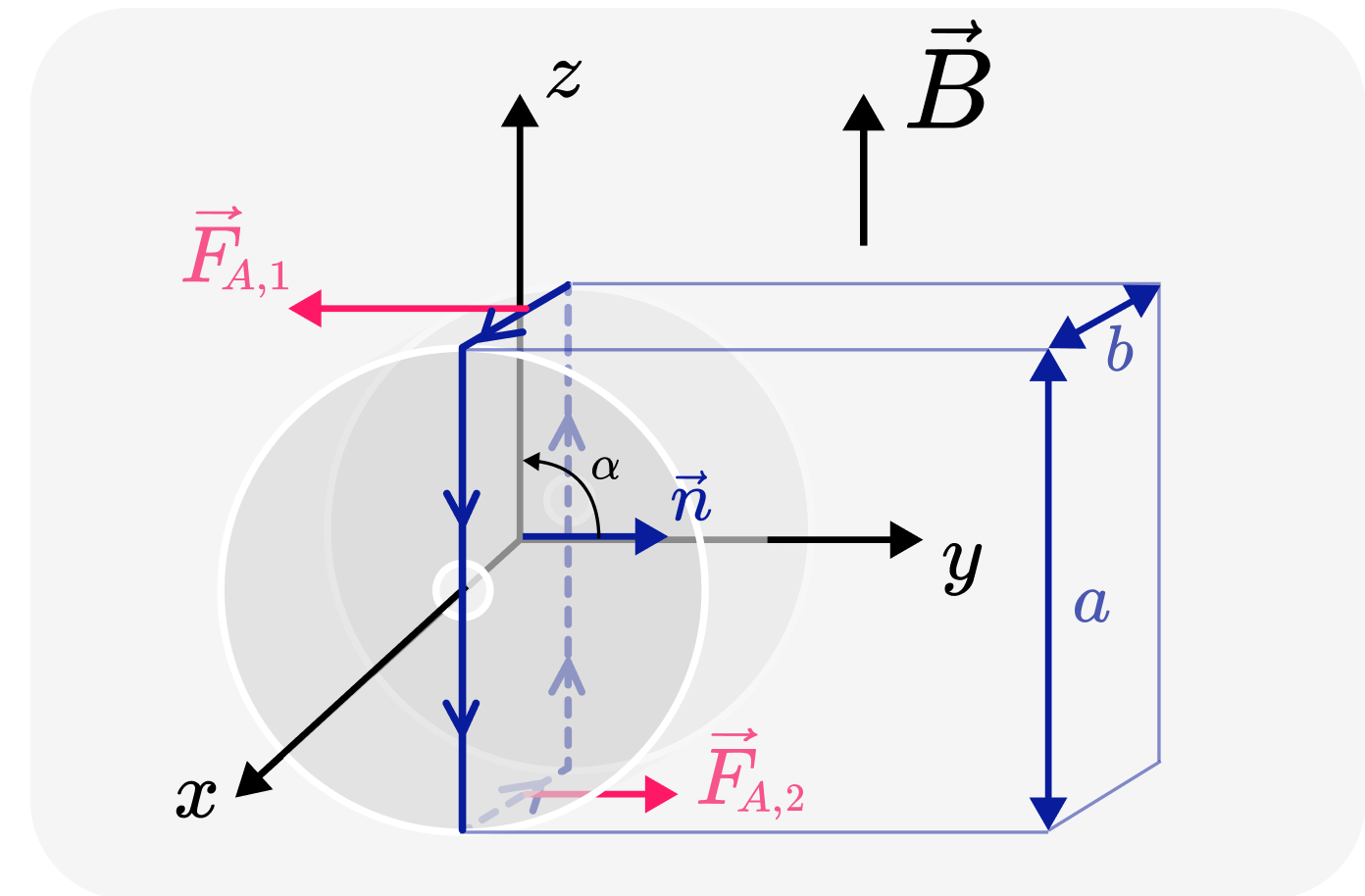
$$\vec{F}_{A,2} = IN \left[-b \cdot \vec{e}_x \times \vec{B}_2 \right] = IN \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ -b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_2 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ INbB_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_0 \left[1 - \beta \left(z - \frac{a}{2} \cos \alpha \right)^2 \right],$$

$$B_2 = B_0 \left[1 - \beta \left(z + \frac{a}{2} \cos \alpha \right)^2 \right].$$

неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/cm}^2.$$

$$z = 4 \text{ cm}$$

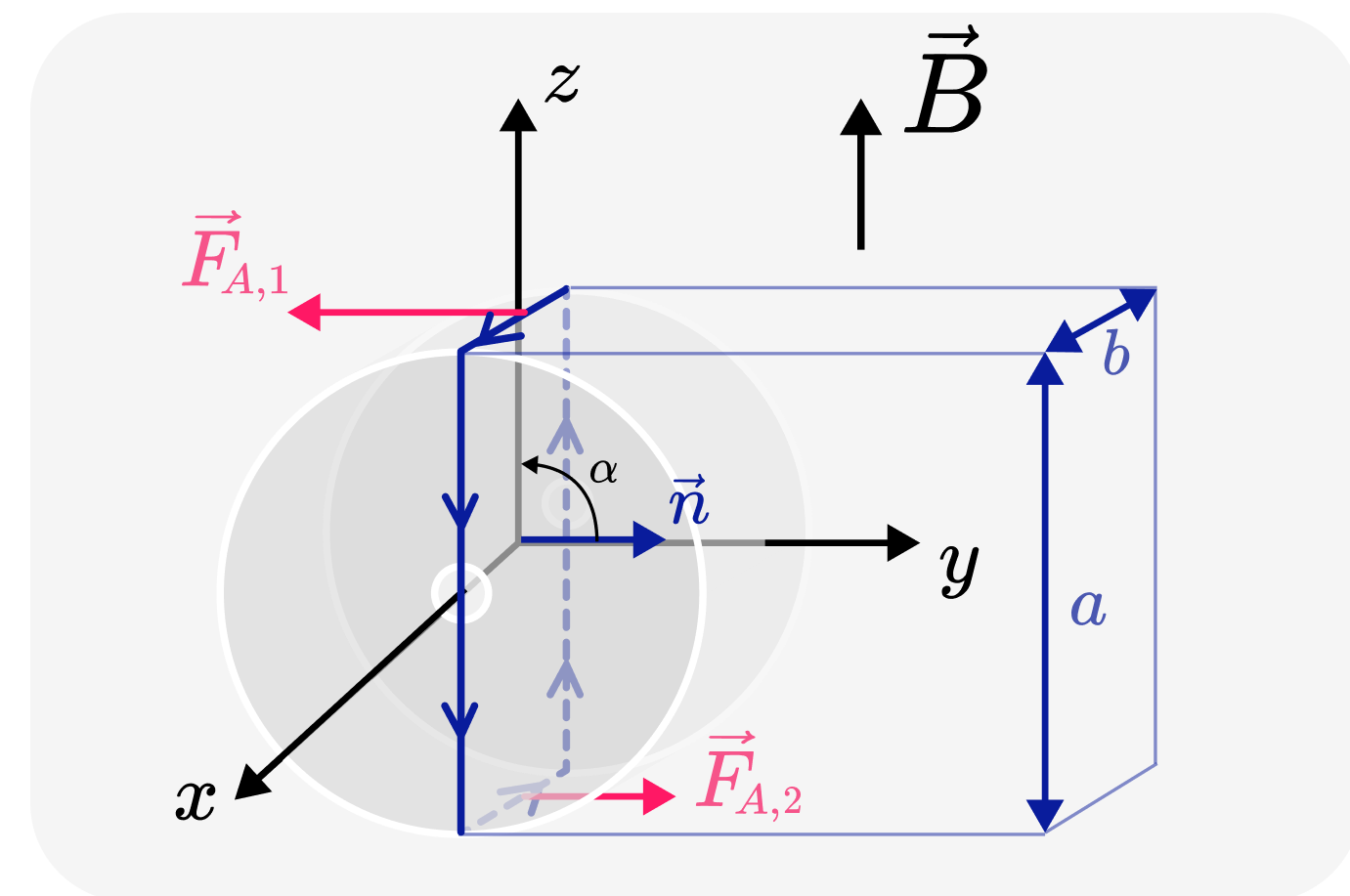
например нескомпенсированная сила Ампера

$$\begin{aligned}\vec{F}_a &= INb(B_2 - B_1)\vec{e}_y \\ &= -INbB_0\beta \left[\left(z + \frac{a}{2} \cos \alpha \right)^2 - \left(z - \frac{a}{2} \cos \alpha \right)^2 \right] \vec{e}_y,\end{aligned}$$

$$\vec{F}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ -INSB_0z\beta \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}$$

неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/cm}^2$$

$$z = 4 \text{ cm}$$

ИЛИ ИЛИ втягивание в градиент

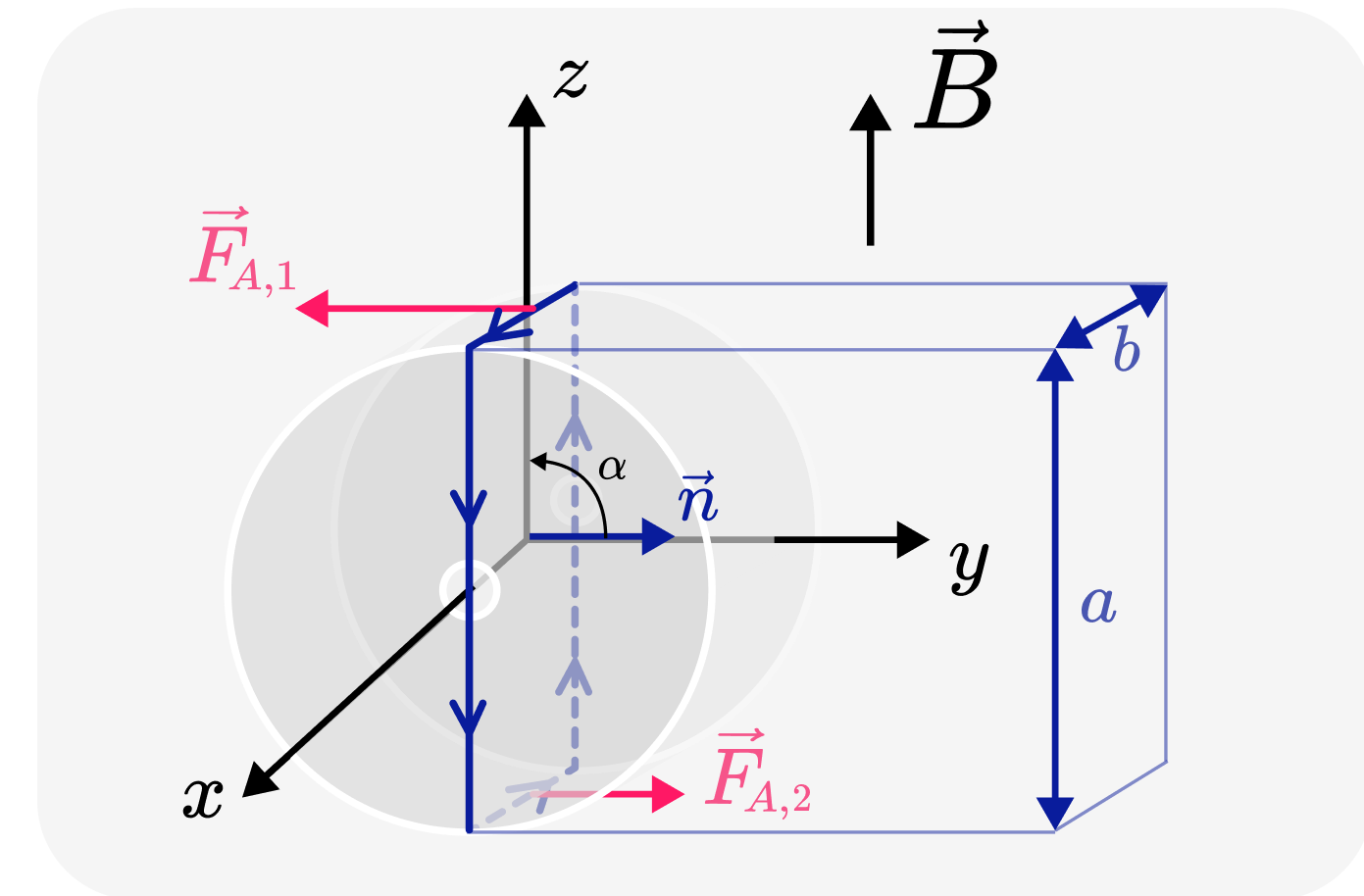
$$\vec{F}_{\nabla} = (\vec{\mu} \cdot \nabla) \vec{B}$$

$$\vec{F}_{\nabla} = \left[\mu_x \frac{\partial}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial}{\partial z} \right] \vec{B} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2\beta\mu_z B_0 \cdot z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2\beta I N S B_0 \sin \alpha \cdot z \end{bmatrix}$$

неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/cm}^2$$

$$z = 4 \text{ cm}$$

таким образом

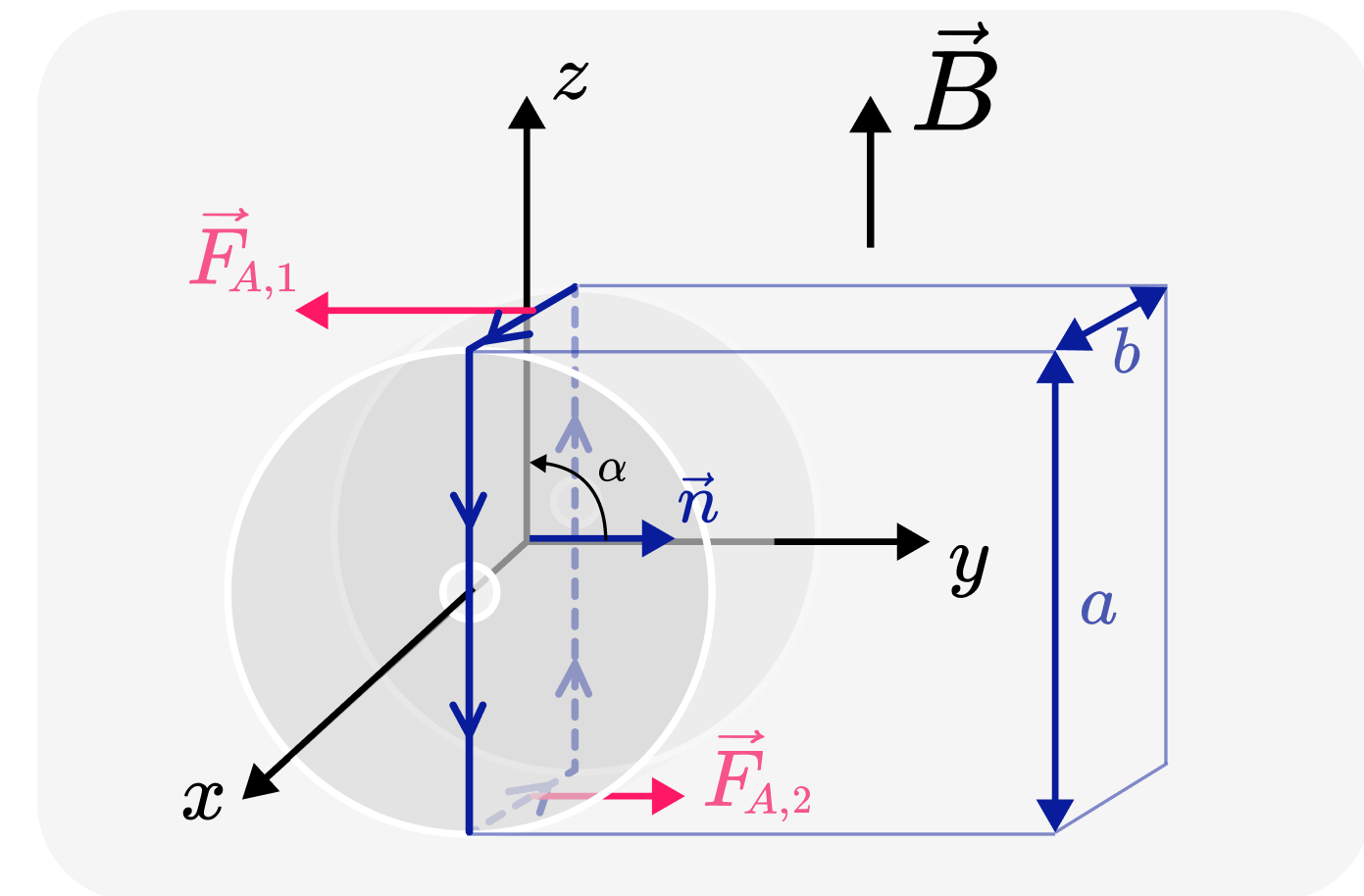
на барабан действует **суммарная сила, не равная нулю**

$$\vec{F}_r = \vec{F}_a + \vec{F}_\nabla = INSB_0 \begin{bmatrix} 0 \\ -\beta \cos \alpha \cdot z \\ -2\beta \sin \alpha \cdot z \end{bmatrix}$$

а значит, возникают **дополнительные силы реакции**, действующие на ось барабана

неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см}^2.$$

$$z = 4 \text{ см}$$

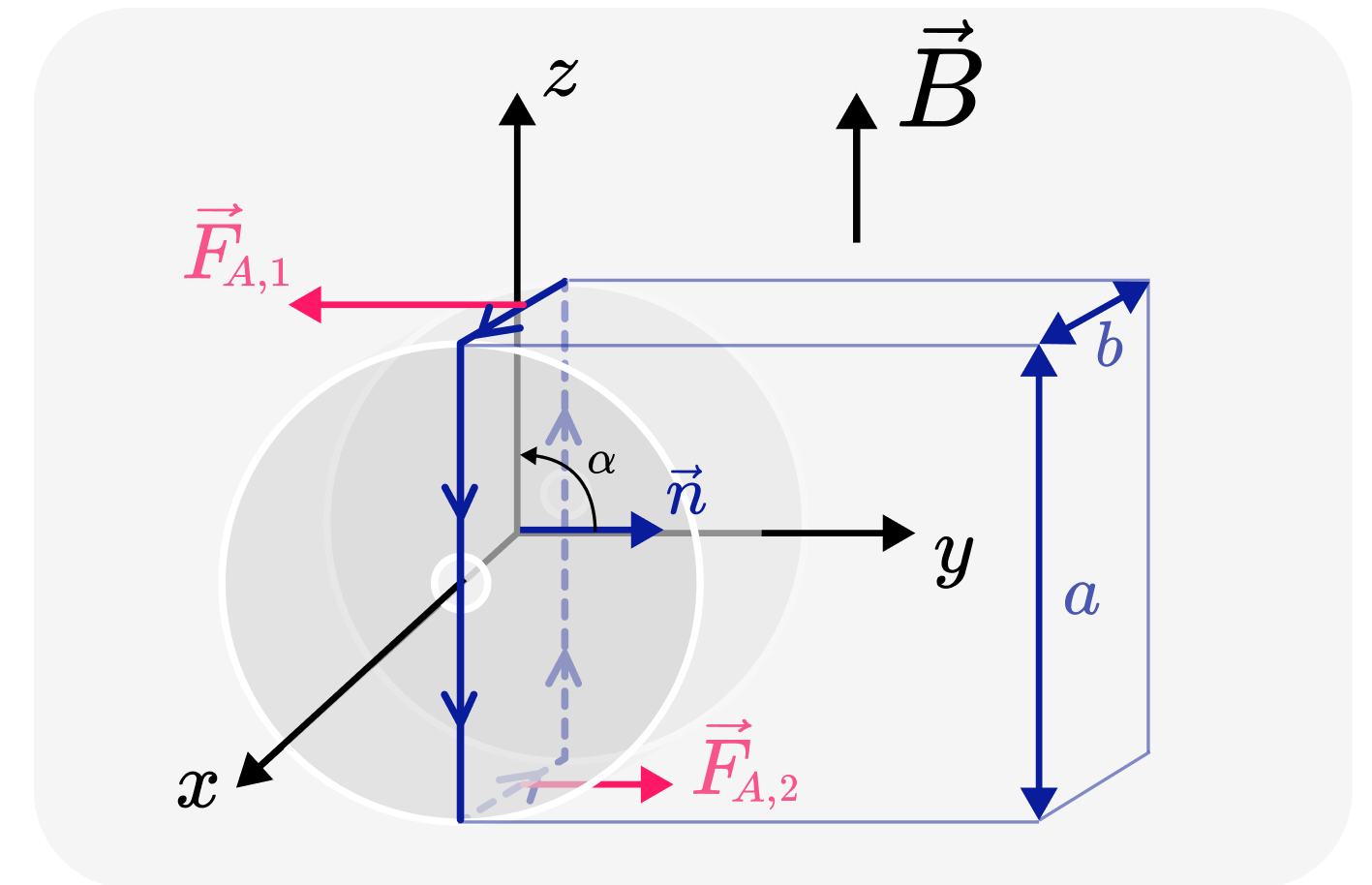
КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ

$$I = 100 \text{ мА}, B_0 = 1 \text{ Тл}, N = 20, S = 1.7 \text{ см}^2:$$

M	$= ISNB_0 =$ $= 100 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 20 \cdot 1 \text{ Тл}$ $= 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$
F_a	$= ISNB_0\beta z = M \cdot \beta z =$ $= 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 2.8 \cdot 10^1 \text{ 1/м}^2 \cdot 0.04 \text{ м} =$ $= 38 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
F_{∇}	$= 2F_a = 96 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$

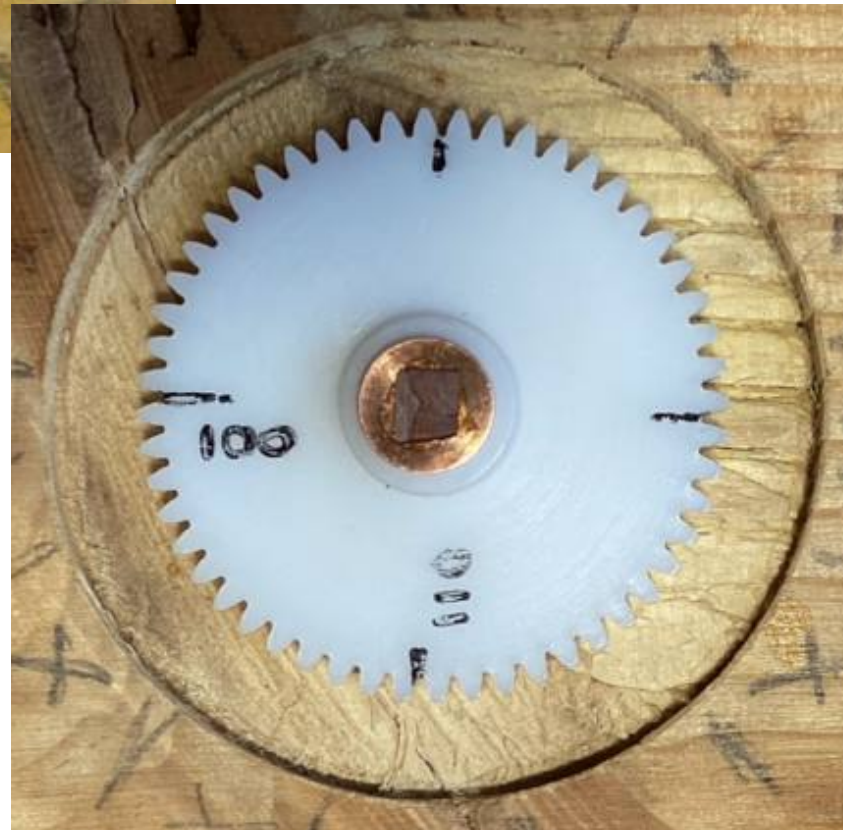
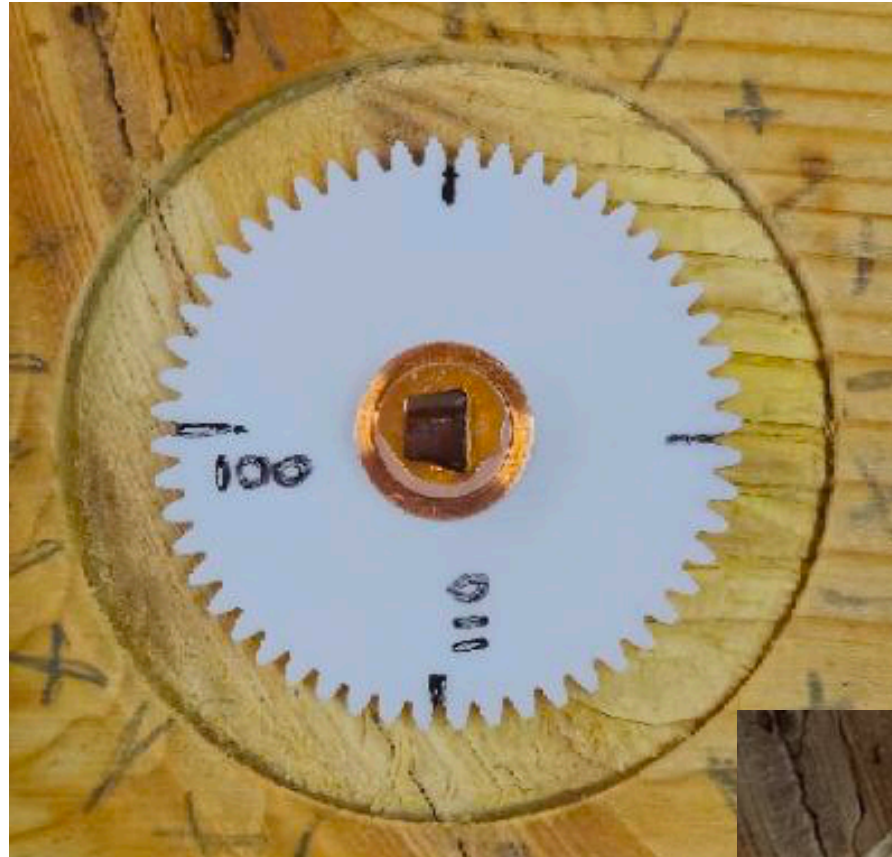
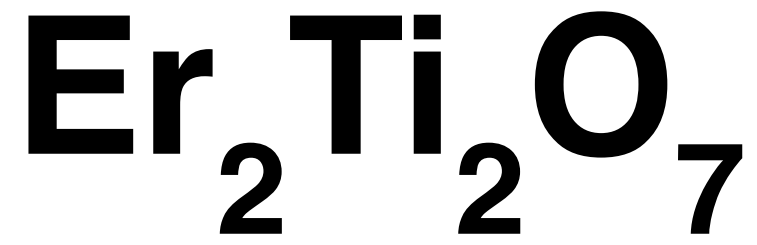
неоднородность поля

$$B = B_0(1 - \beta z^2)$$



$$\beta = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см}^2.$$

$$z = 4 \text{ см}$$



- разные образцы: 33 мг и 14 мг
- вырезаны в виде тонких пластин
- приклеивались к монтажной площадке плоскостью типа $[1\bar{1}0]$, магнитное поле приложено в плоскости пластины

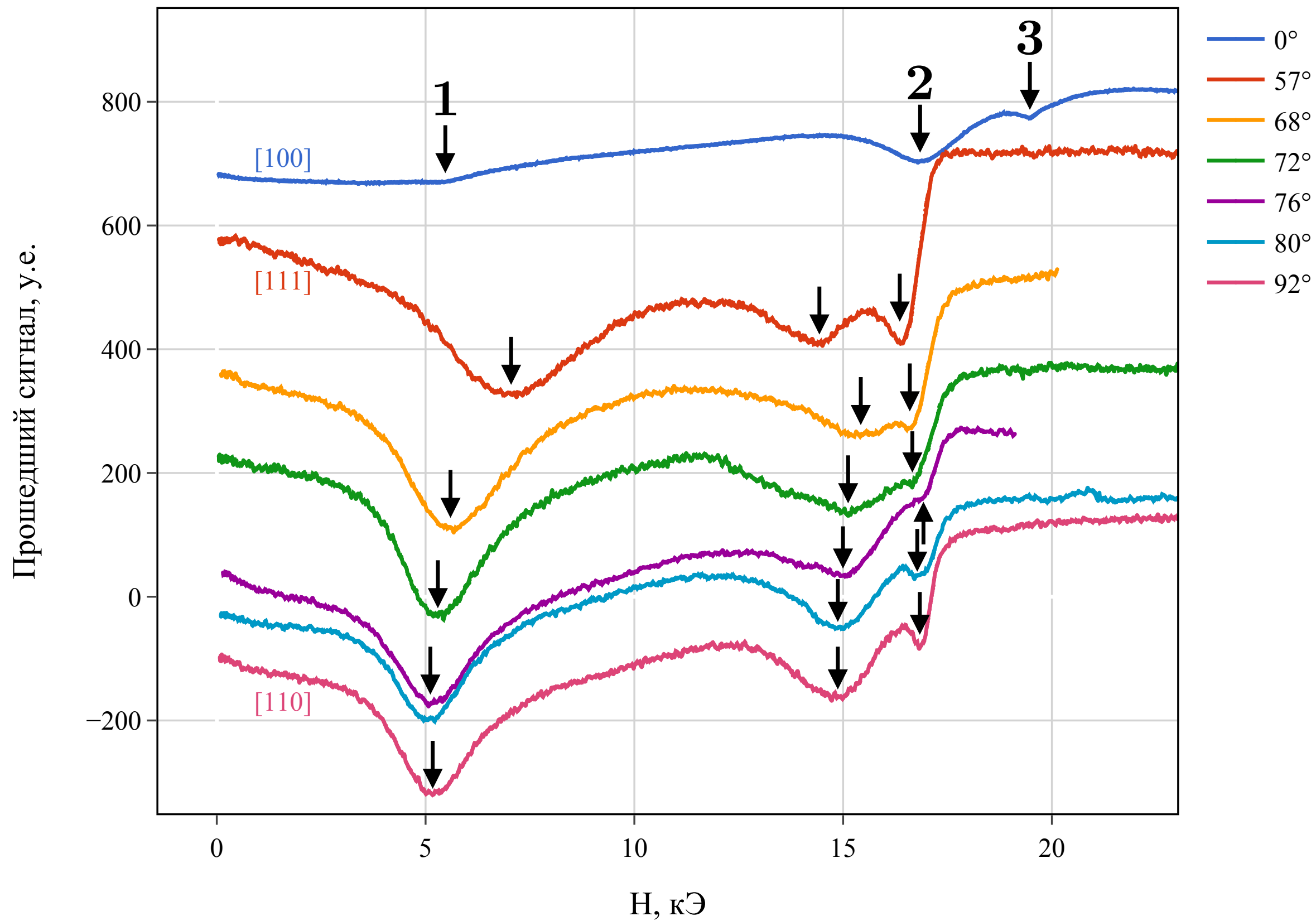
$$\varphi^{[100]} = 0^\circ,$$

$$\varphi^{[111]} = 55^\circ,$$

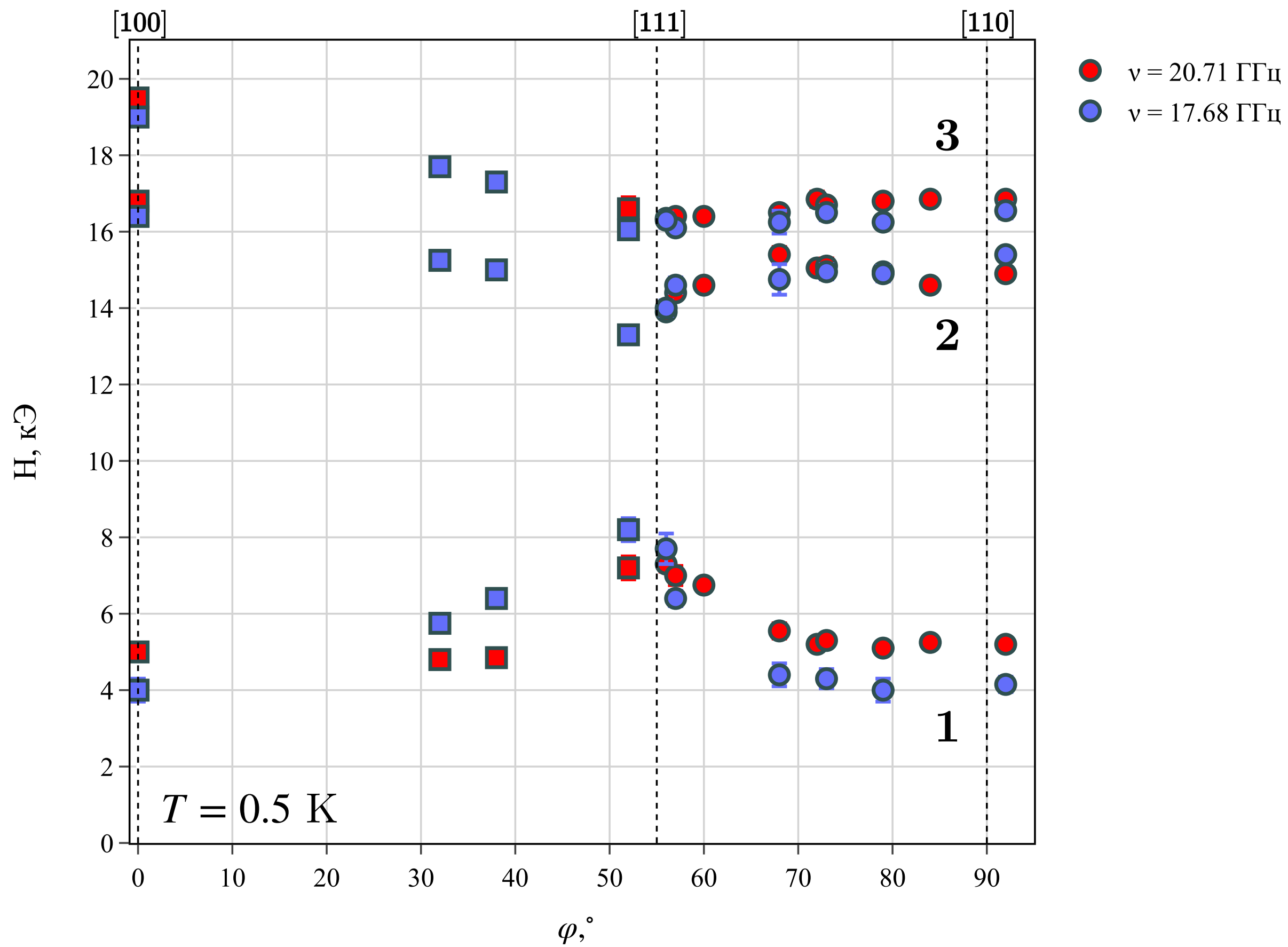
$$\varphi^{[110]} = 90^\circ.$$

угловая зависимость

$\nu = 20.71$ ГГц, $T = 0.55$ К

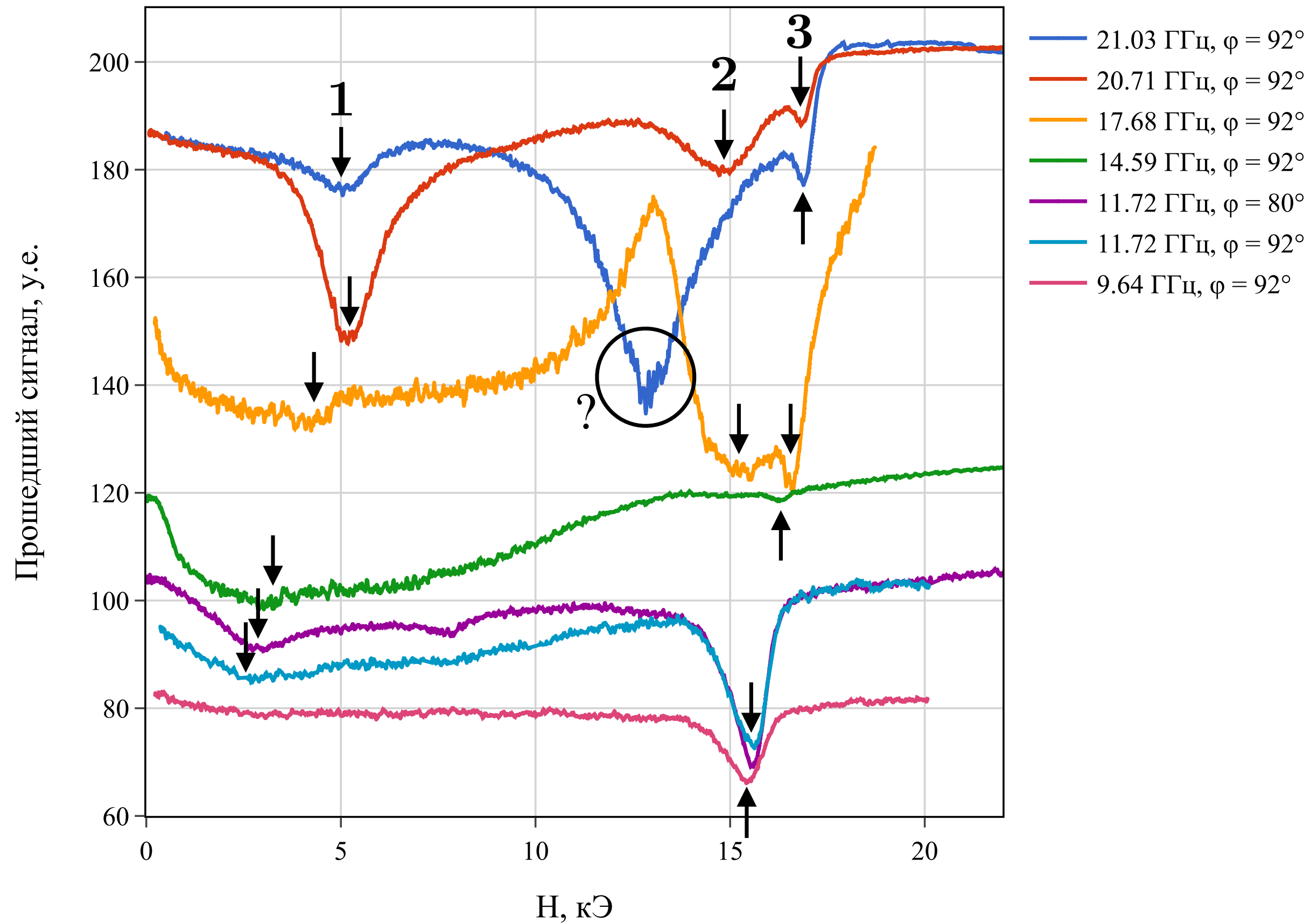


угловая зависимость



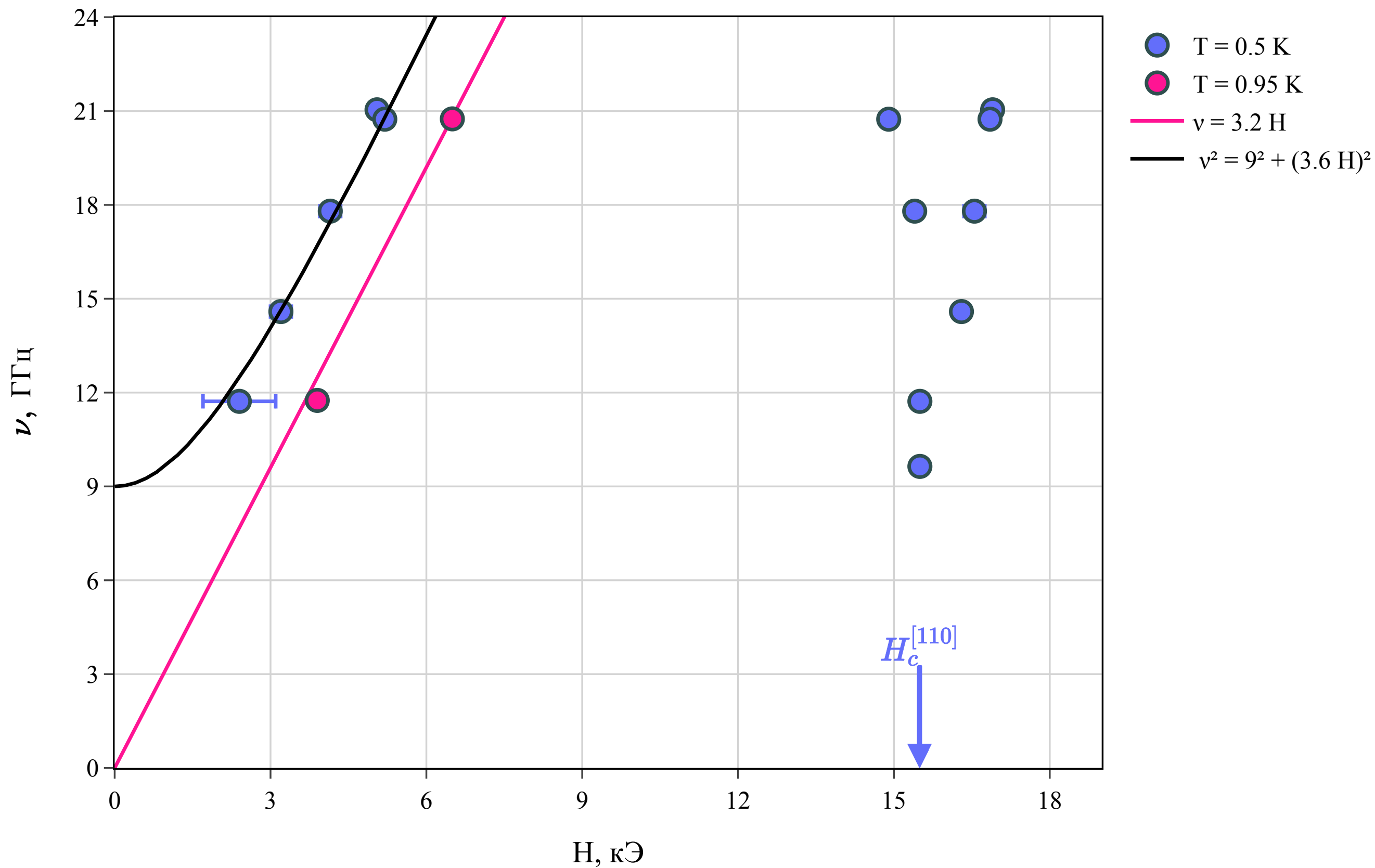
Частотно-полевая зависимость [110]

$H \parallel [110], T = 0.5 \text{ K}$



Частотно-полевая диаграмма [110]

$H \parallel [110]$

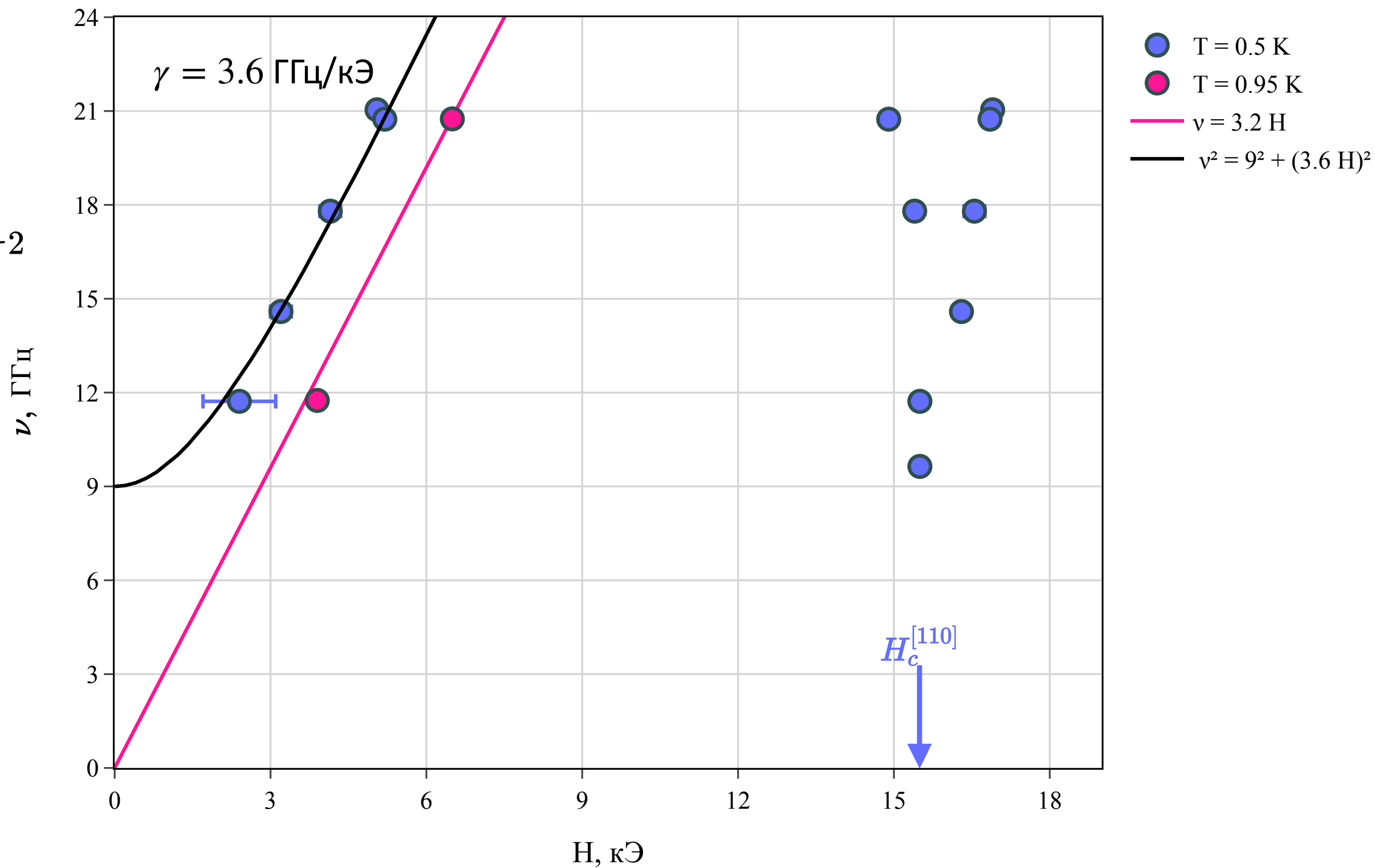


Частотно-полевая диаграмма [110]

$H \parallel [110]$

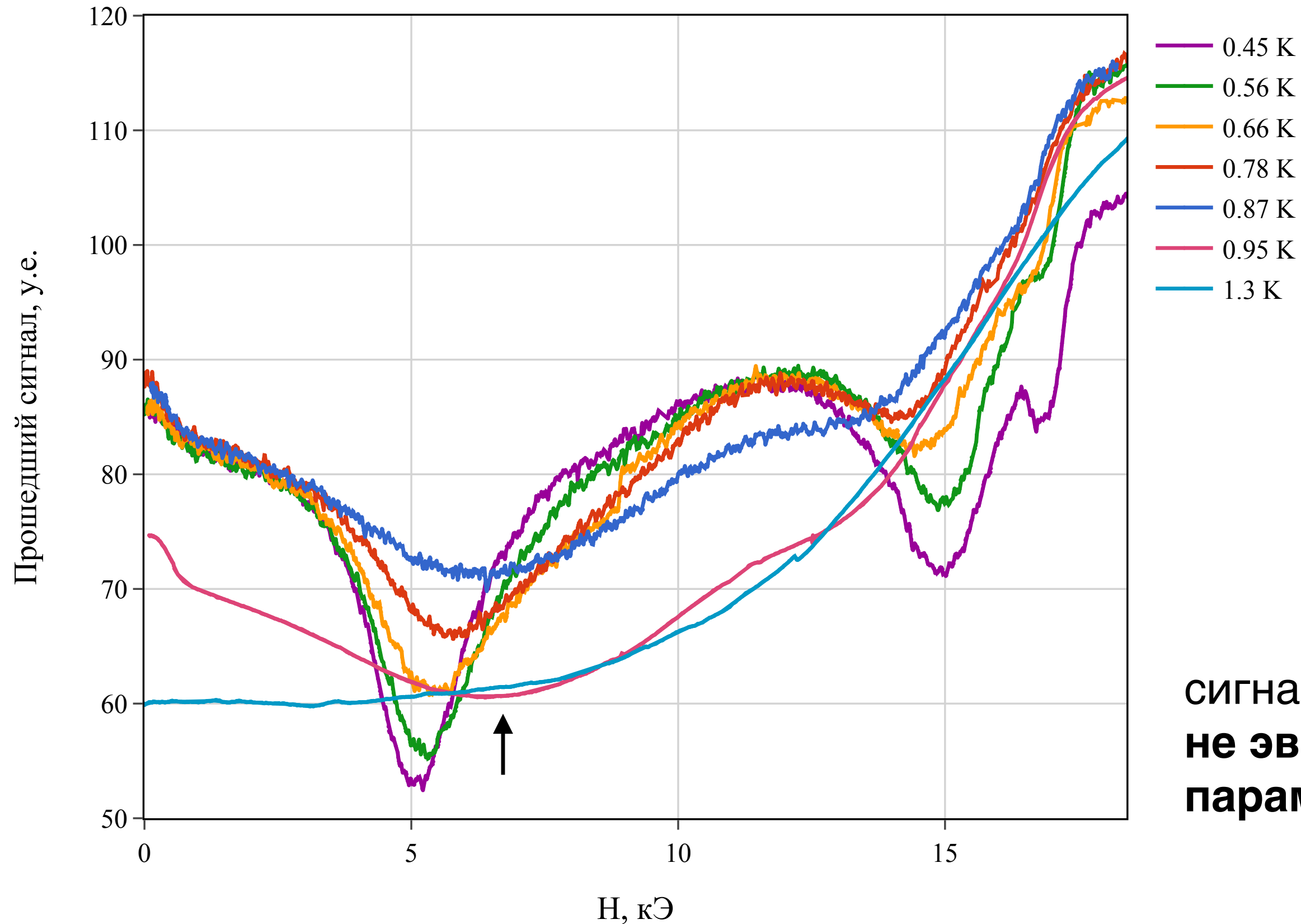
наивно:

$$\nu^2 = \Delta^2 + \gamma^2 H^2$$



температурная зависимость [110]

$$\nu = 20.71 \text{ ГГц}, \varphi = 80^\circ$$



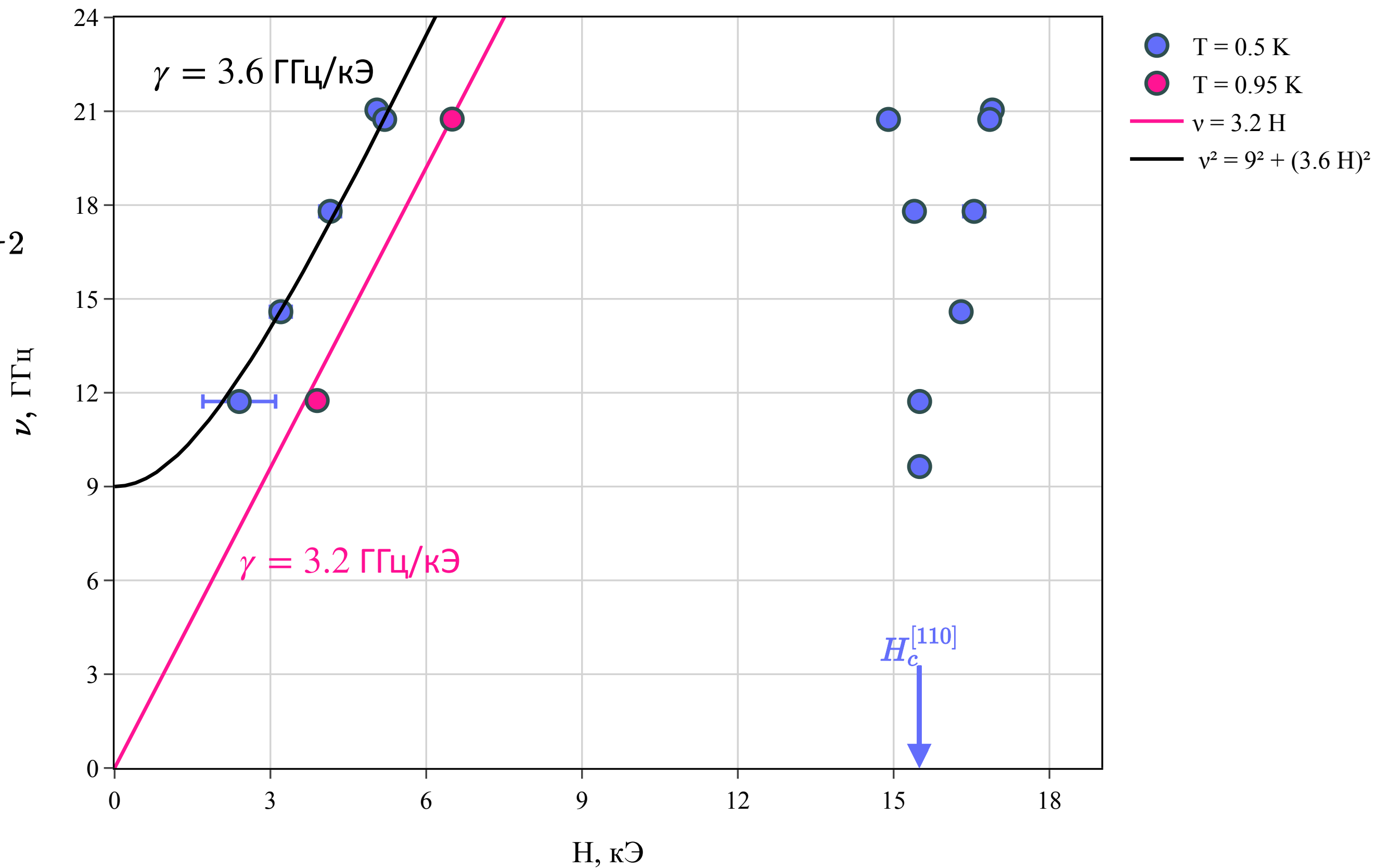
сигнал при температурах $\sim T_N$
не эволюционирует в
парамагнитный!

Частотно-полевая диаграмма [110]

$H \parallel [110]$

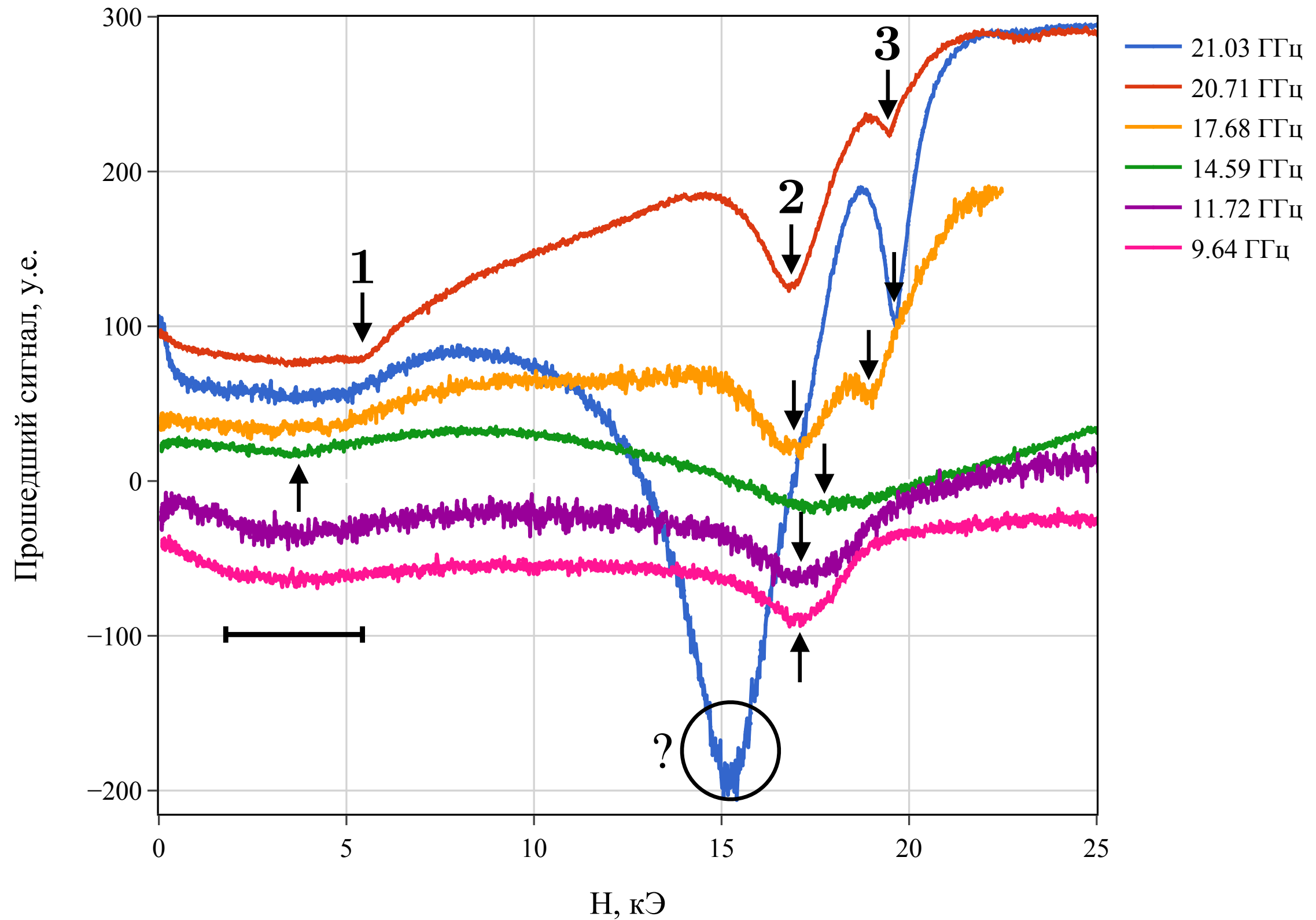
наивно:

$$\nu^2 = \Delta^2 + \gamma^2 H^2$$



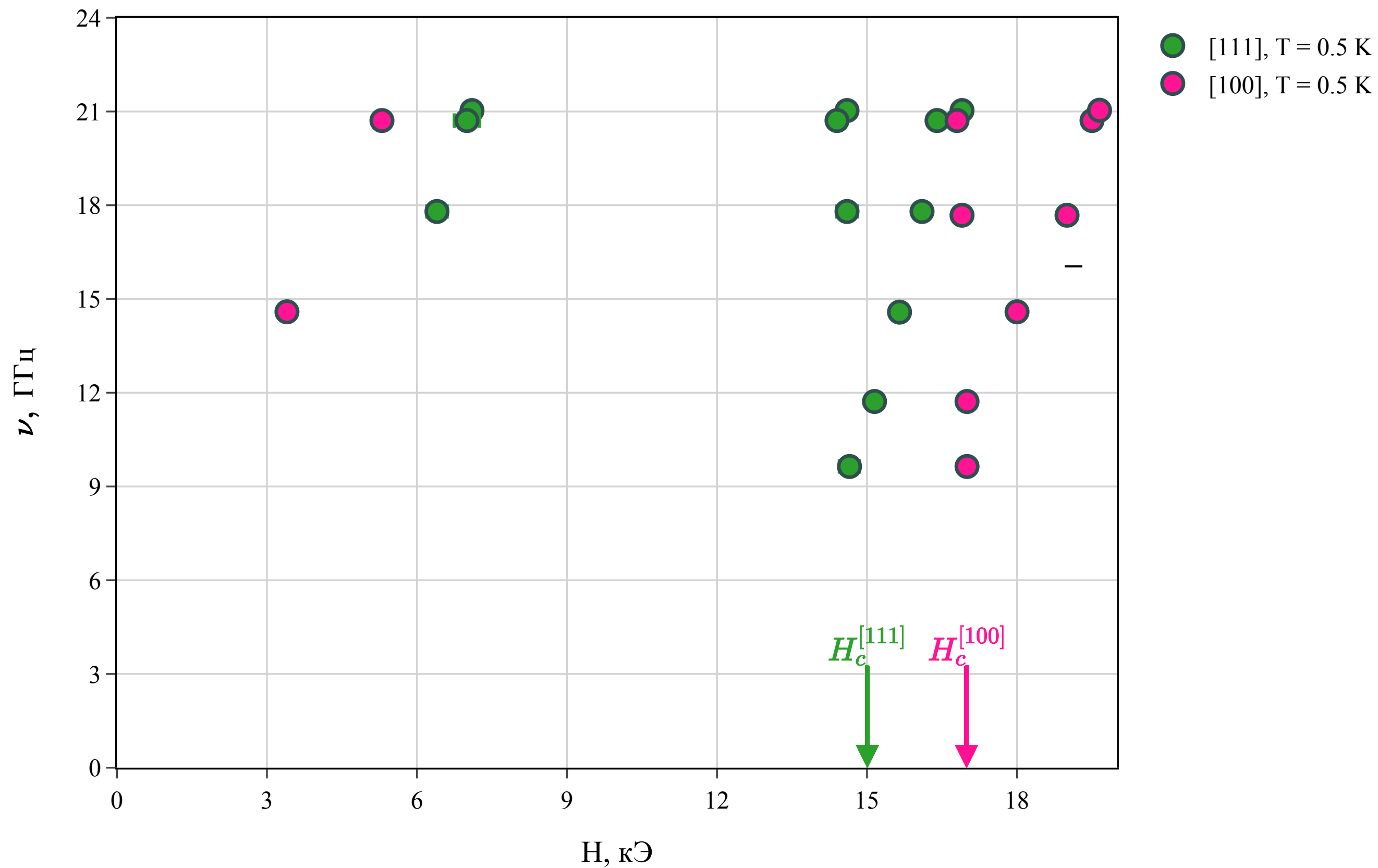
Частотно-полевая зависимость [100]

$H \parallel [100], T = 0.5 \text{ К}$

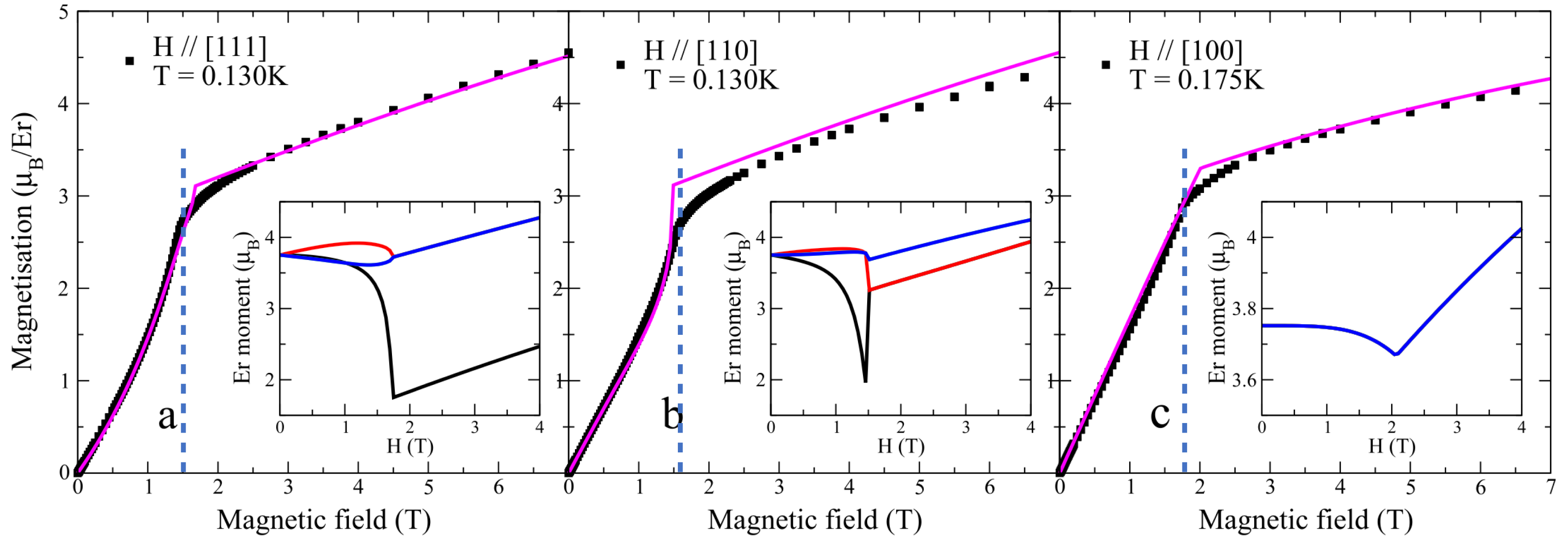


Частотно-полевые диаграммы

$H \parallel [111]$ и $H \parallel [100]$



(заодно)



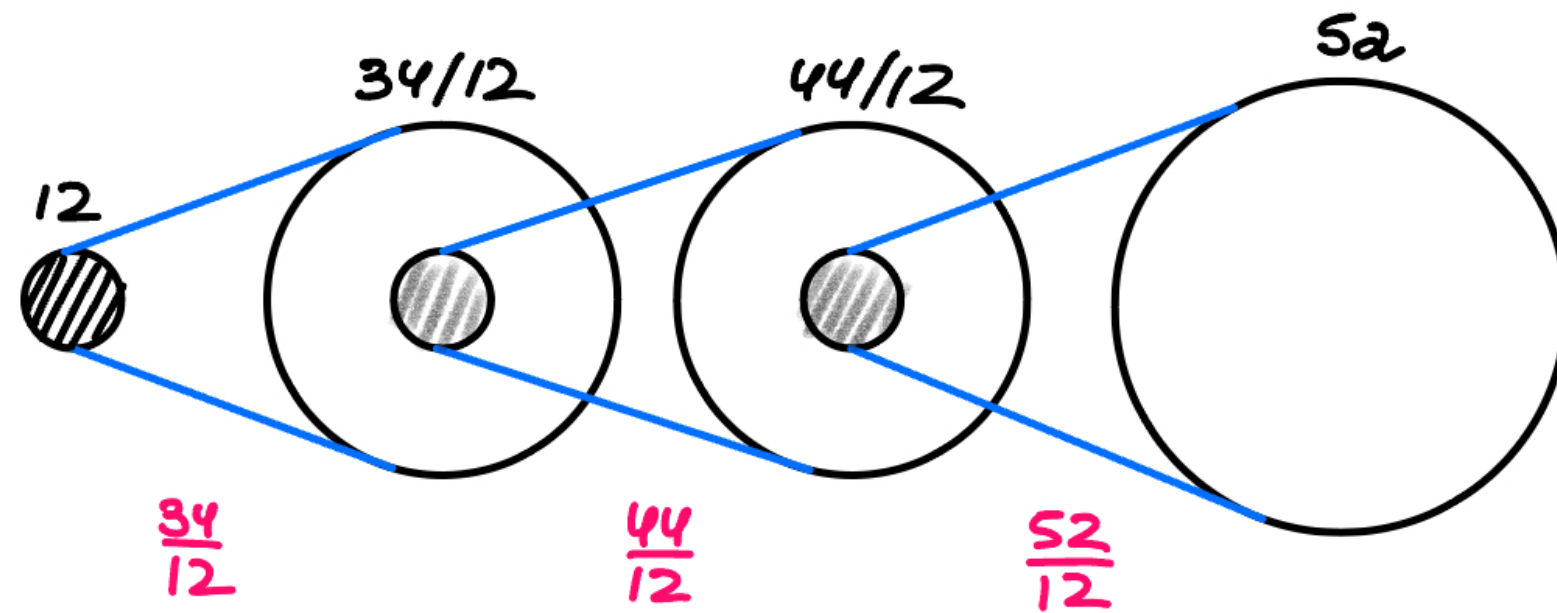
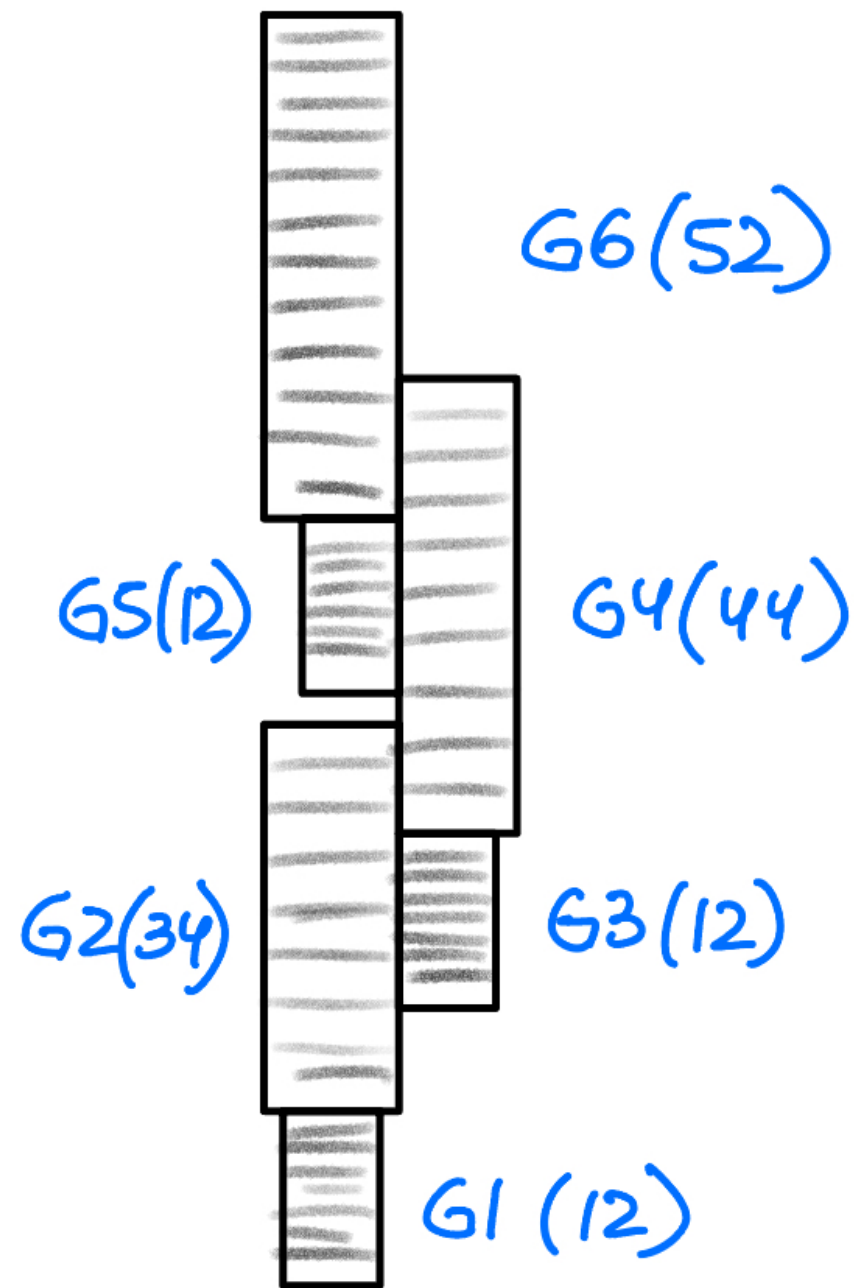
P. Bonville et al., J. Phys.: Condens. Matter (2013)

$$H_c^{[111]} \simeq 15.0 \text{ кЭ}$$

$$H_c^{[110]} \simeq 15.5 \text{ кЭ}$$

$$H_c^{[100]} \simeq 17.0 \text{ кЭ}$$

Шестерёнки



Передаточное число:

$$u = \frac{34 \cdot 44 \cdot 52}{12 \cdot 12 \cdot 12} = \frac{2431}{54} \approx 45.02$$

Если ведущий вал поворачивается на 90° , то ведомый вал:

$$\Delta\varphi = 90^\circ \cdot \frac{1}{u} = \frac{90 \cdot 54}{2431} = 1 \frac{2429}{2431} \approx 1.999^\circ$$