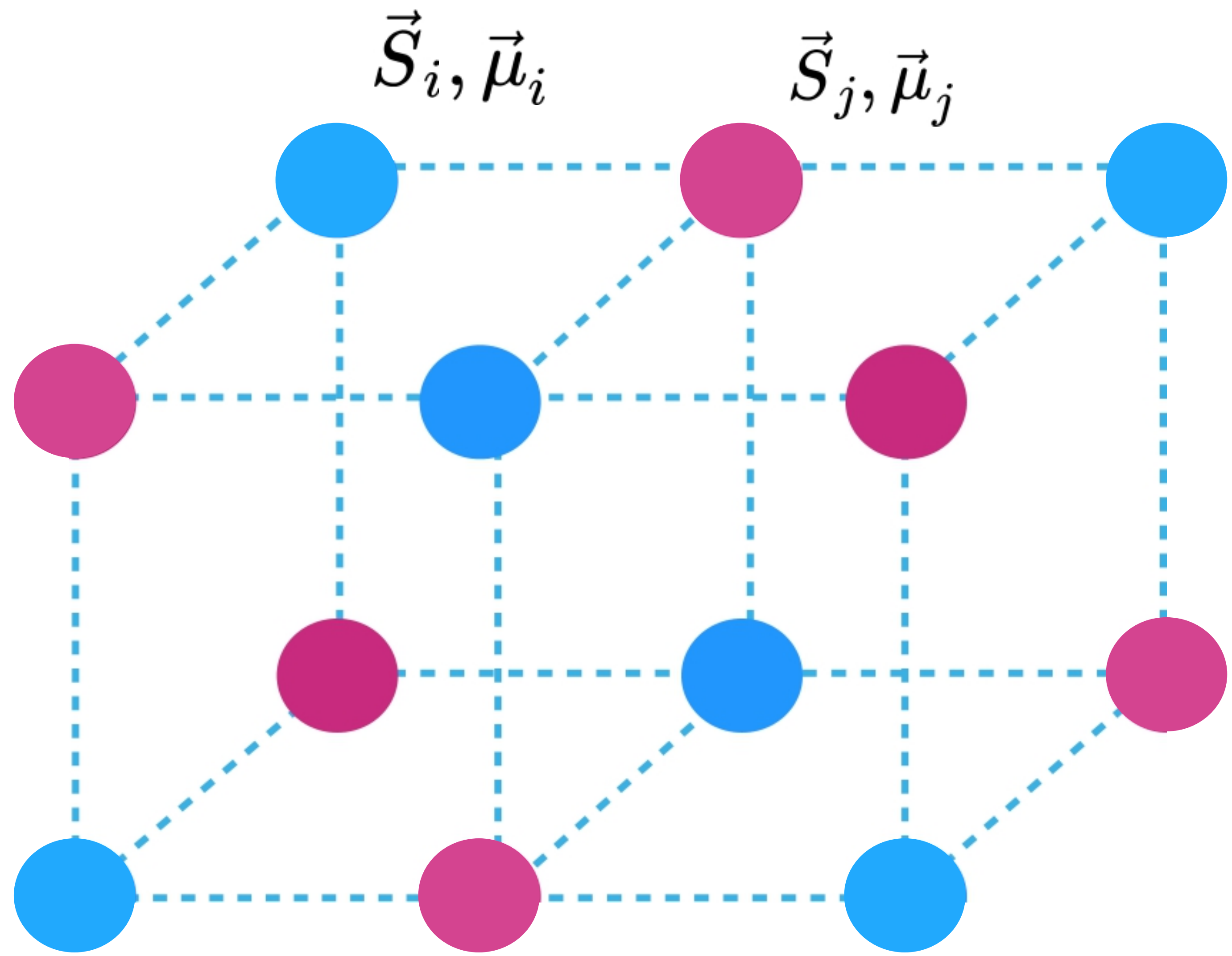
Яфарова А.Ф. Семинар НУГ ЭПР

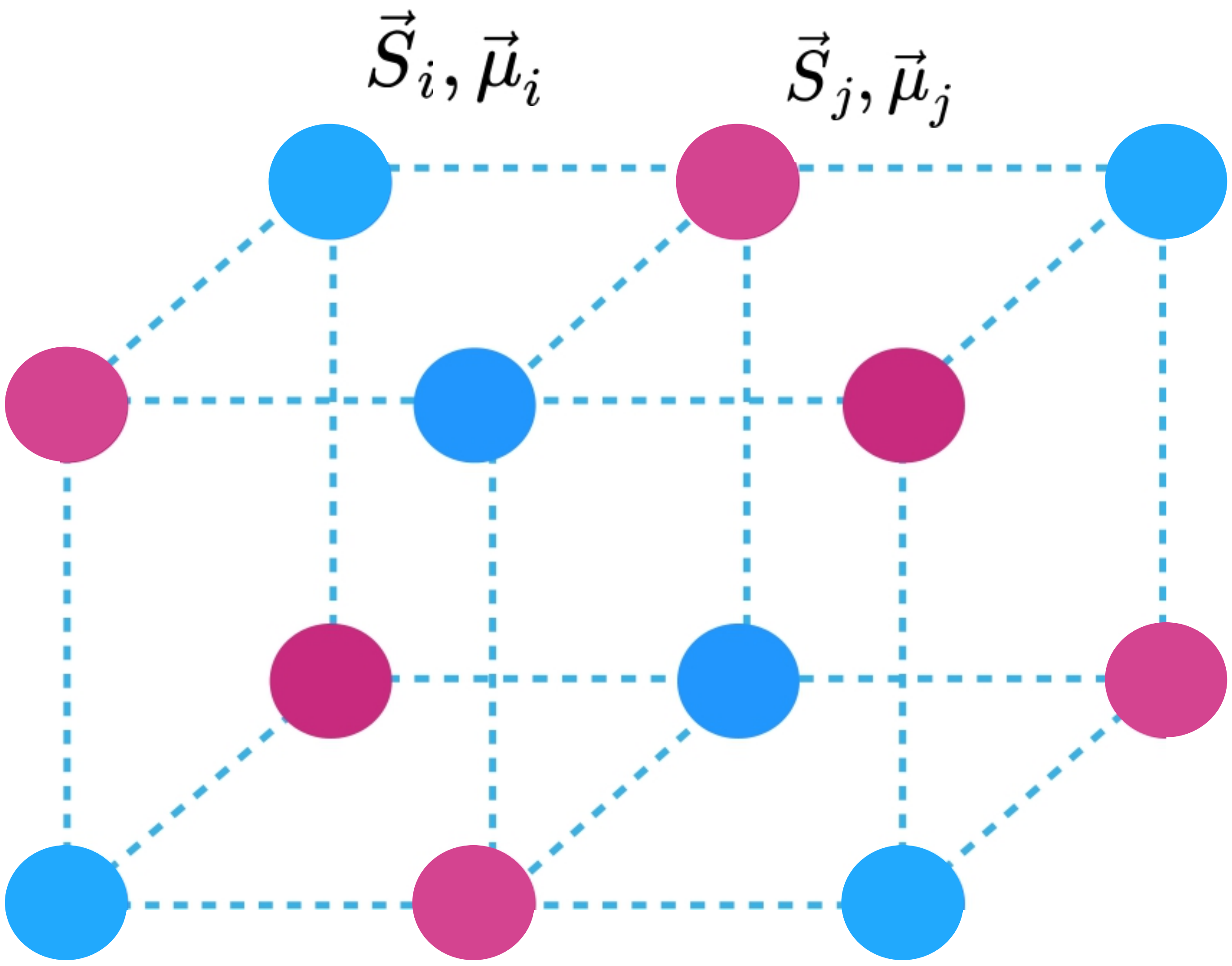
АНТИФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

магнитный кристалл



обменное взаимодействие

$$\mathcal{H} = \sum_{<ij>} J_{ij}\left(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j\right)$$

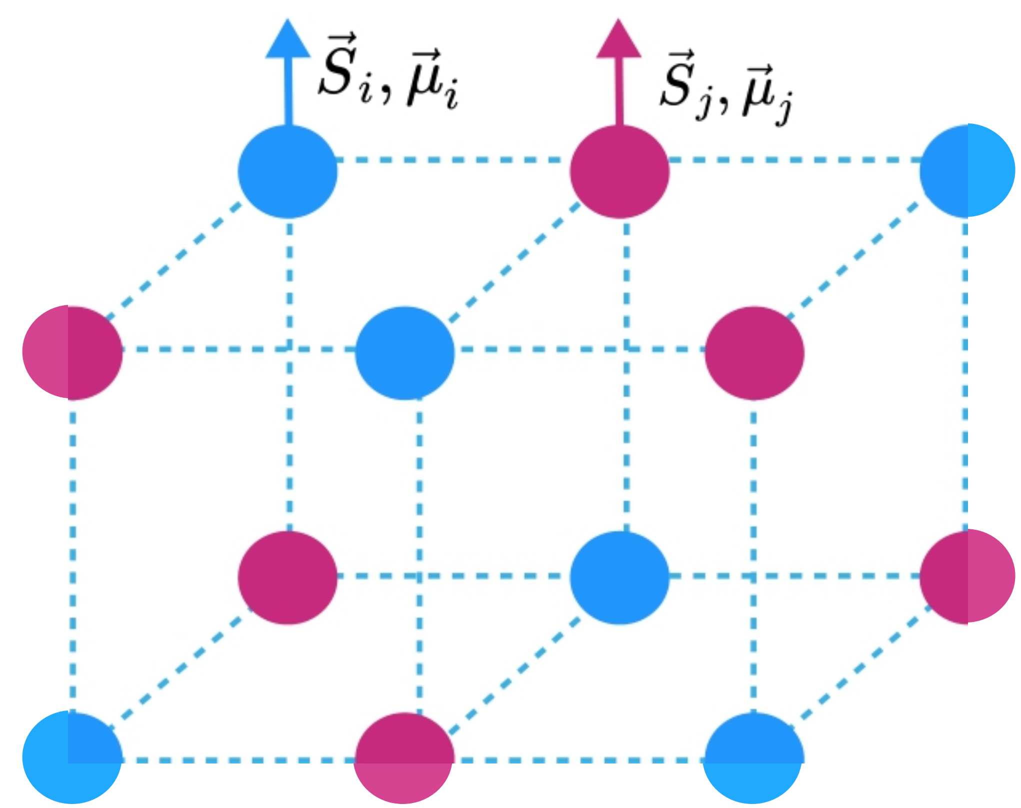


обменное взаимодействие

$$2(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j) = (\vec{S}_i + \vec{S}_j)^2 - (\vec{S}_i)^2 - (\vec{S}_j)^2$$

$$\mathcal{H} = J \sum_{<ij>} \left(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j\right) = \frac{J}{2} \sum_{<ij>} \left[(\vec{S}_{tot})^2 - (\vec{S}_i)^2 - (\vec{S}_j)^2 \right]$$

$$\begin{array}{c} \boxed{J < 0} \\ \downarrow \\ \boxed{\vec{S}_{tot} \rightarrow max} \end{array}$$

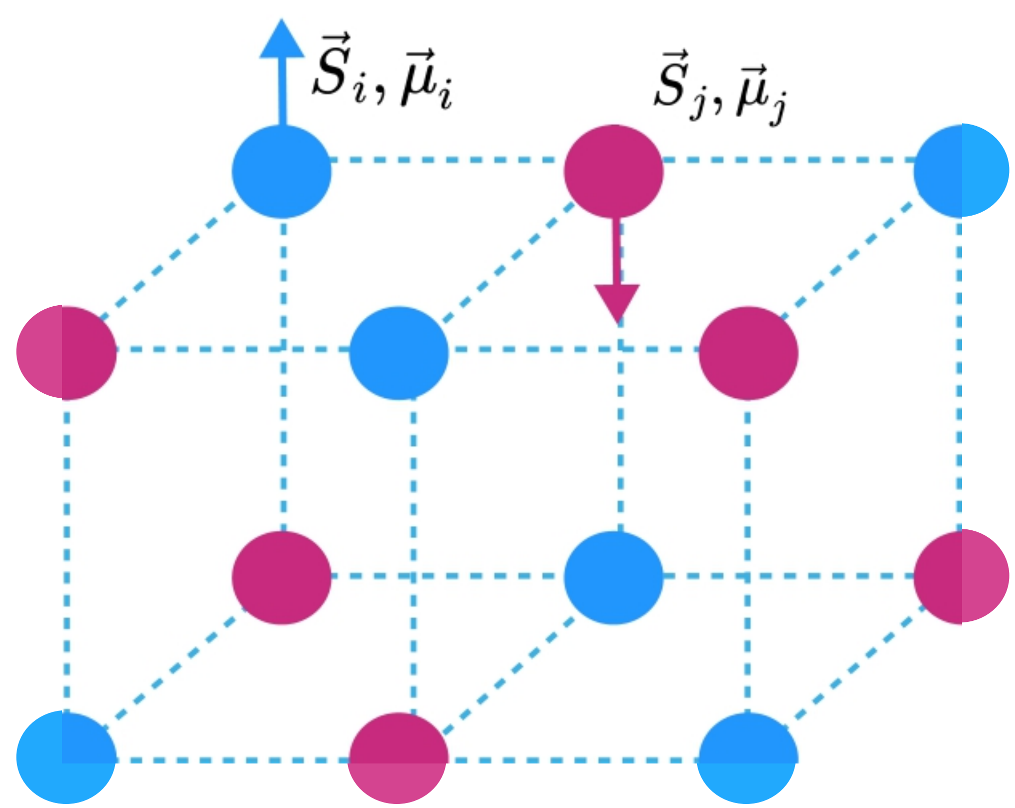


обменное взаимодействие

$$2(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j) = (\vec{S}_i + \vec{S}_j)^2 - (\vec{S}_i)^2 - (\vec{S}_j)^2$$

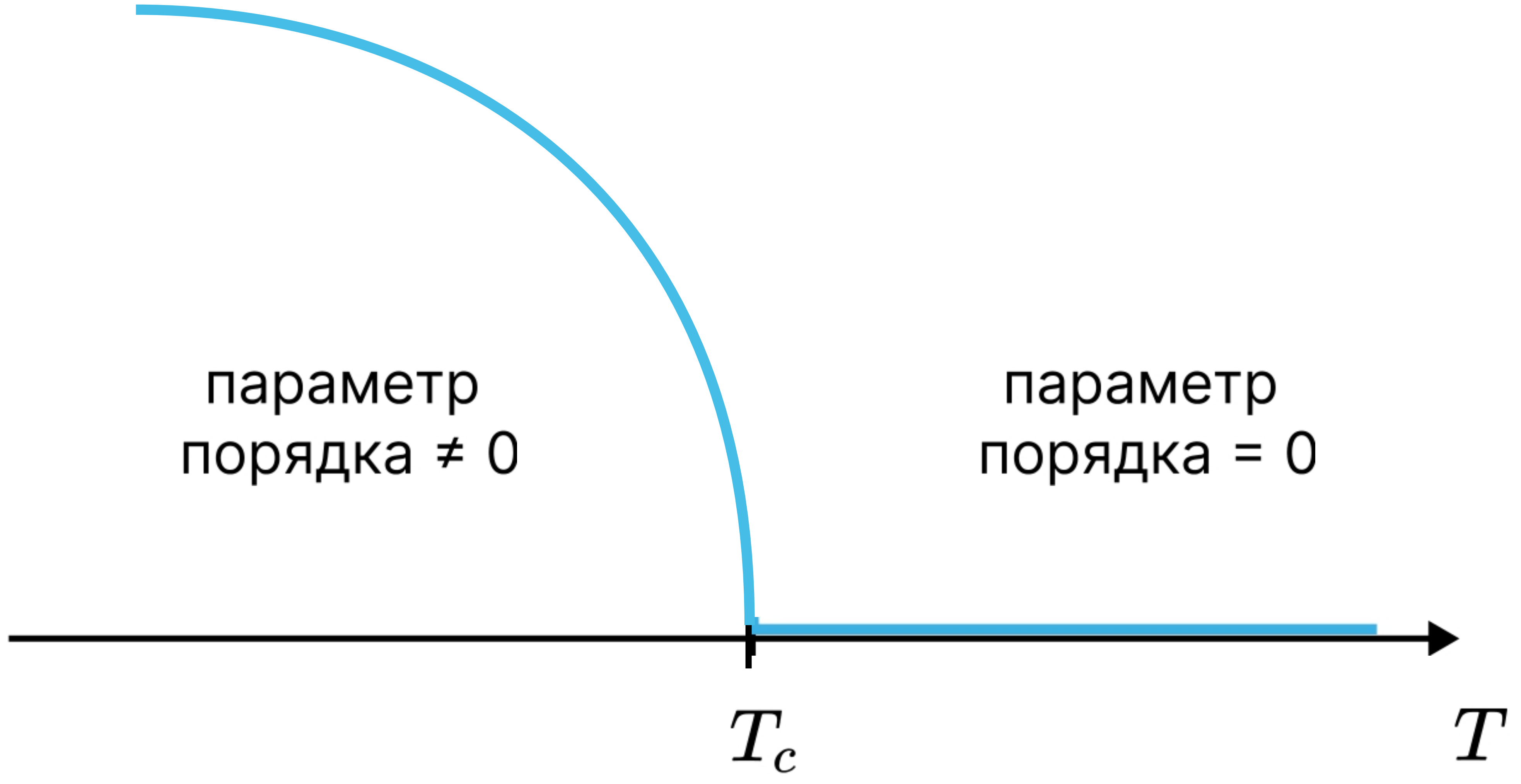
$$\mathcal{H} = J \sum_{<ij>} \left(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \right) = \frac{J}{2} \sum_{<ij>} \left[(\vec{S}_{tot})^2 - (\vec{S}_i)^2 - (\vec{S}_j)^2 \right]$$

$$\boxed{J > 0} \;\longrightarrow\; \boxed{\vec{S}_{tot} \to min}$$



а как такие системы упорядочиваются?

параметр порядка

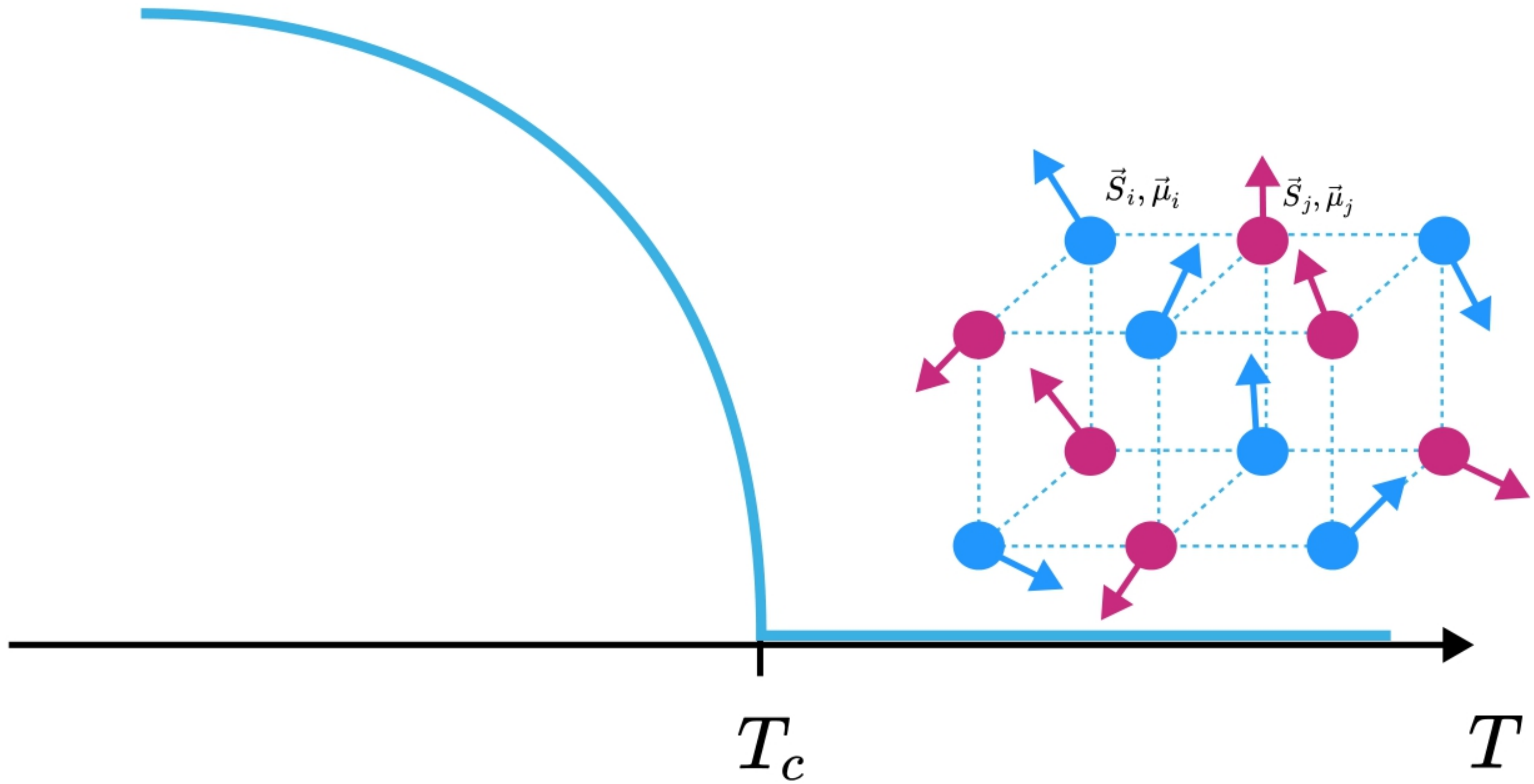


параметр порядка

$$J < 0$$

$$\downarrow$$

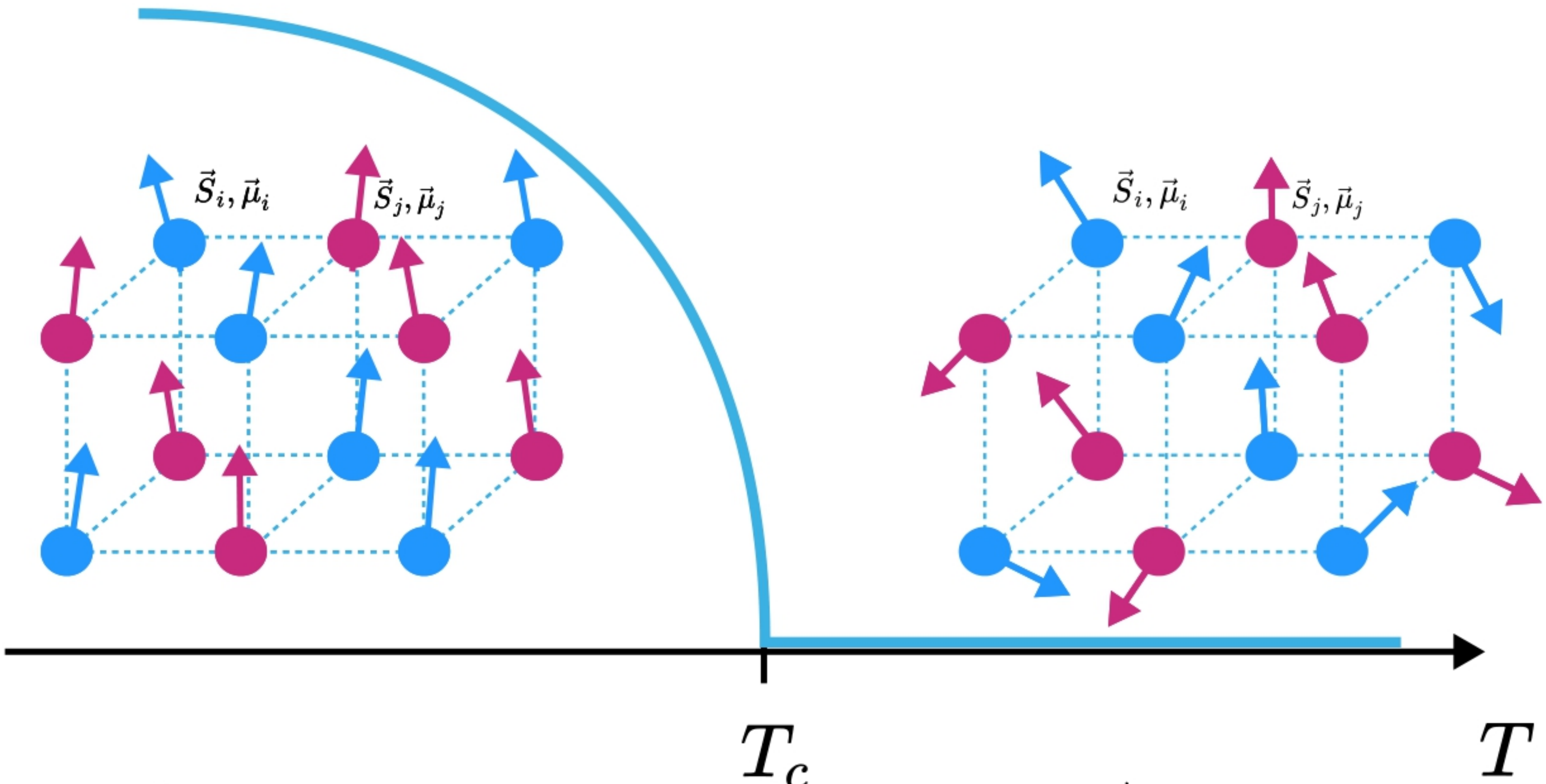
$$\vec{S}_{tot} \to max$$



ферромагнитный порядок

$J < 0$

$\vec{S}_{tot} \to max$



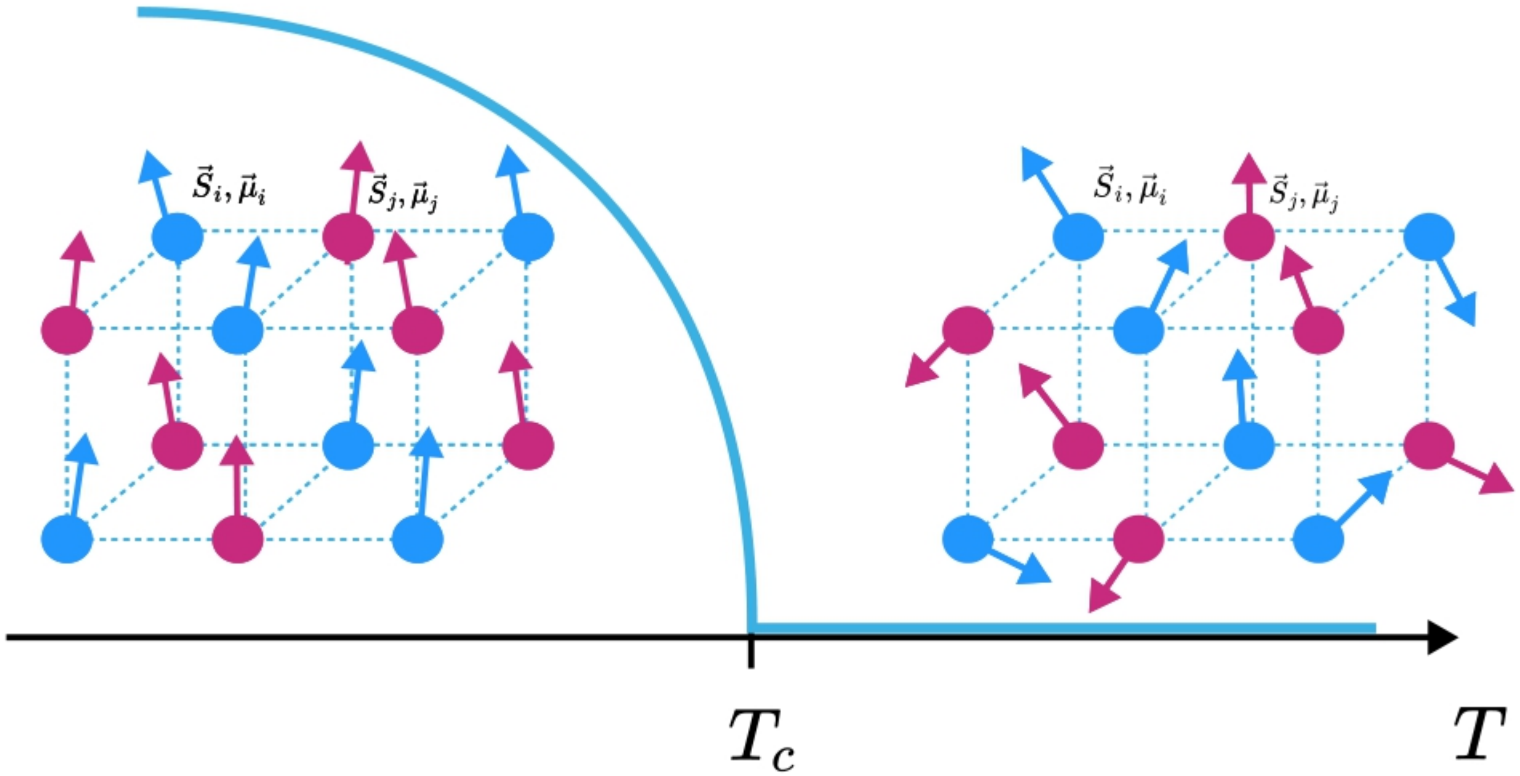
$\langle \vec{M} \rangle \neq 0$

$\langle \vec{M} \rangle = 0$

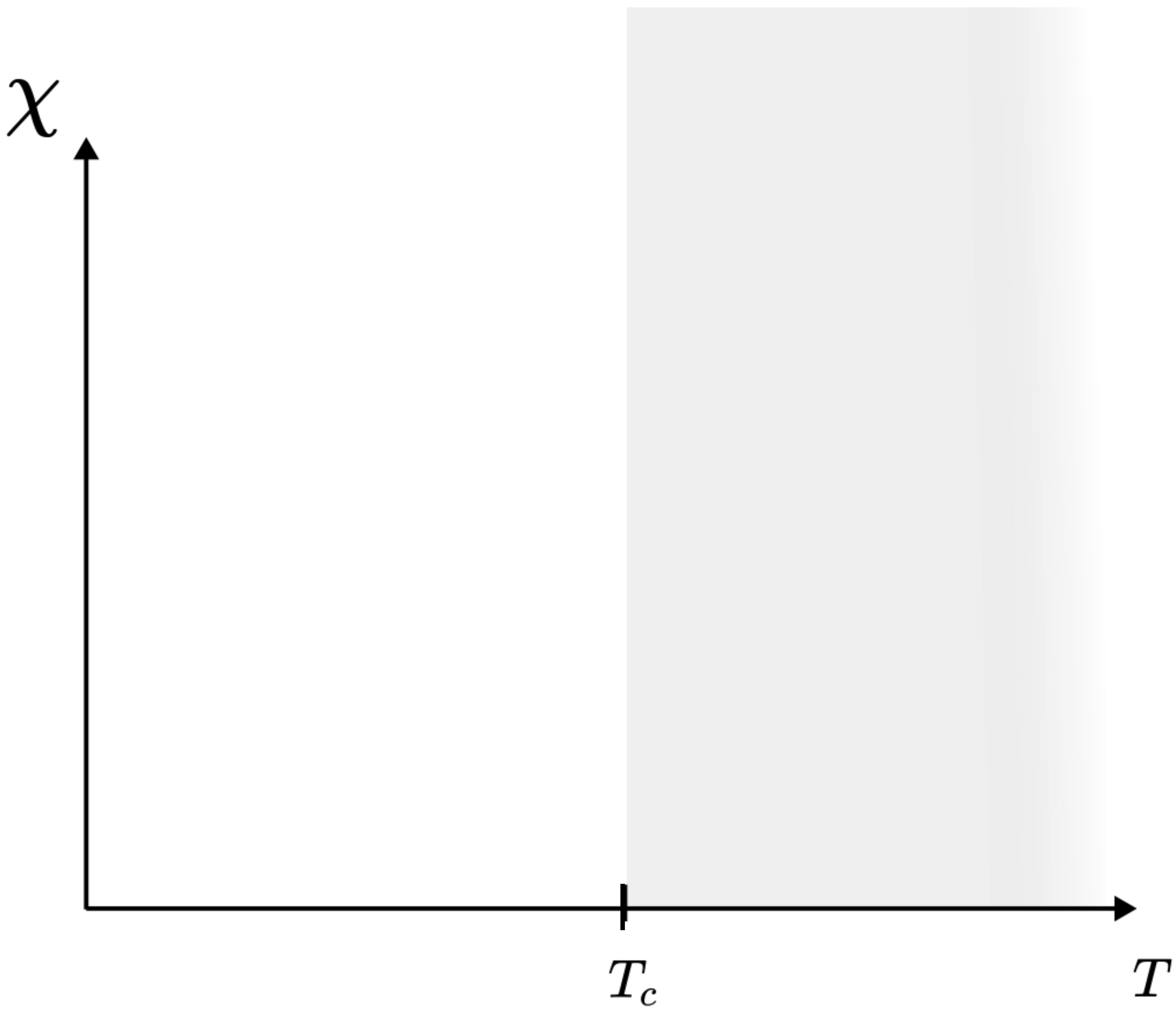
ФМ переход

приближение среднего поля:

$$\vec{B}_E = \lambda \vec{M}$$



ФМ переход

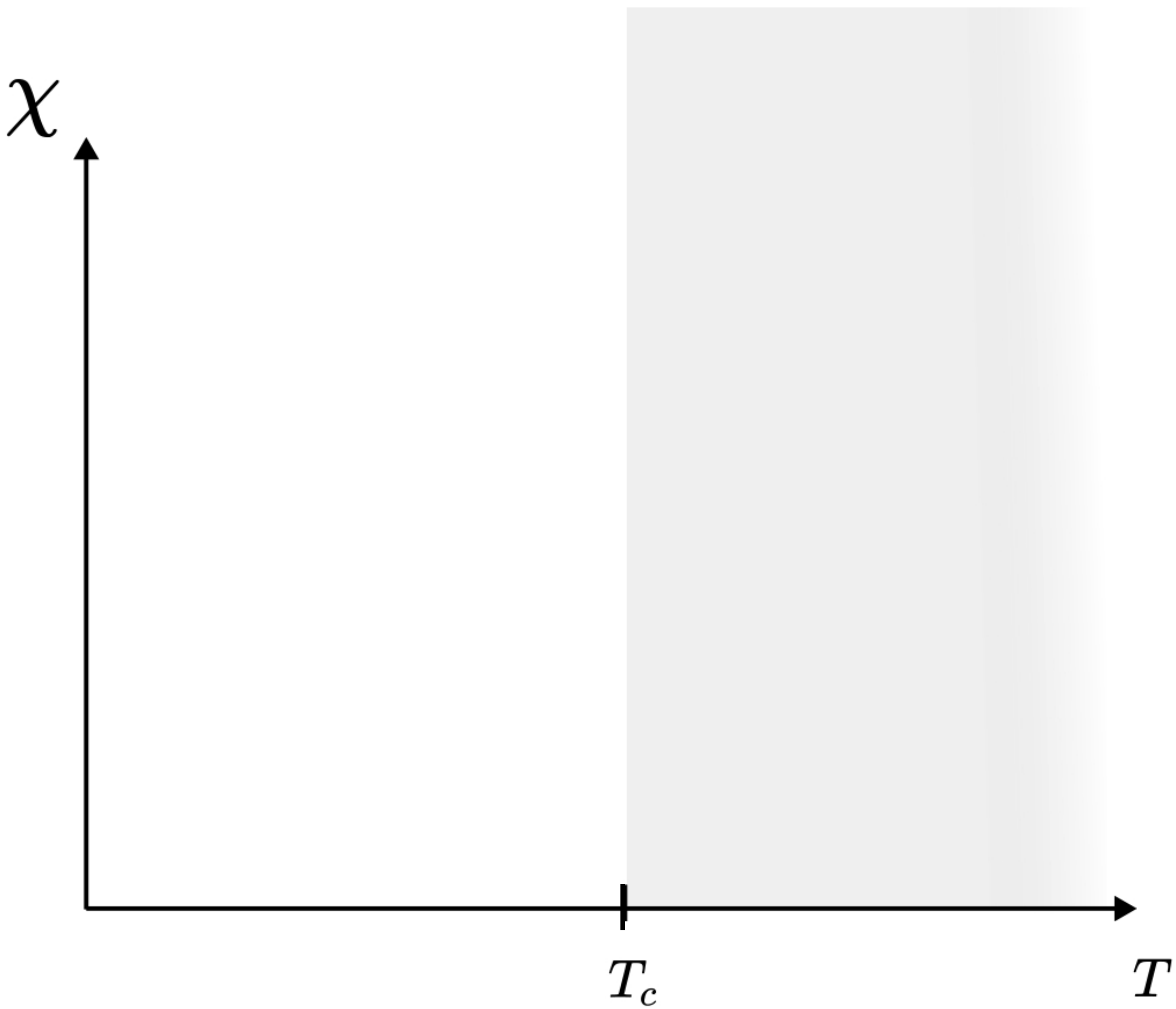


$$T_c < T$$

$$\chi = \frac{C}{T}$$

$$M = \chi(B + B_E)$$

ФМ переход



$$T_c < T$$

$$\chi = \frac{C}{T}$$

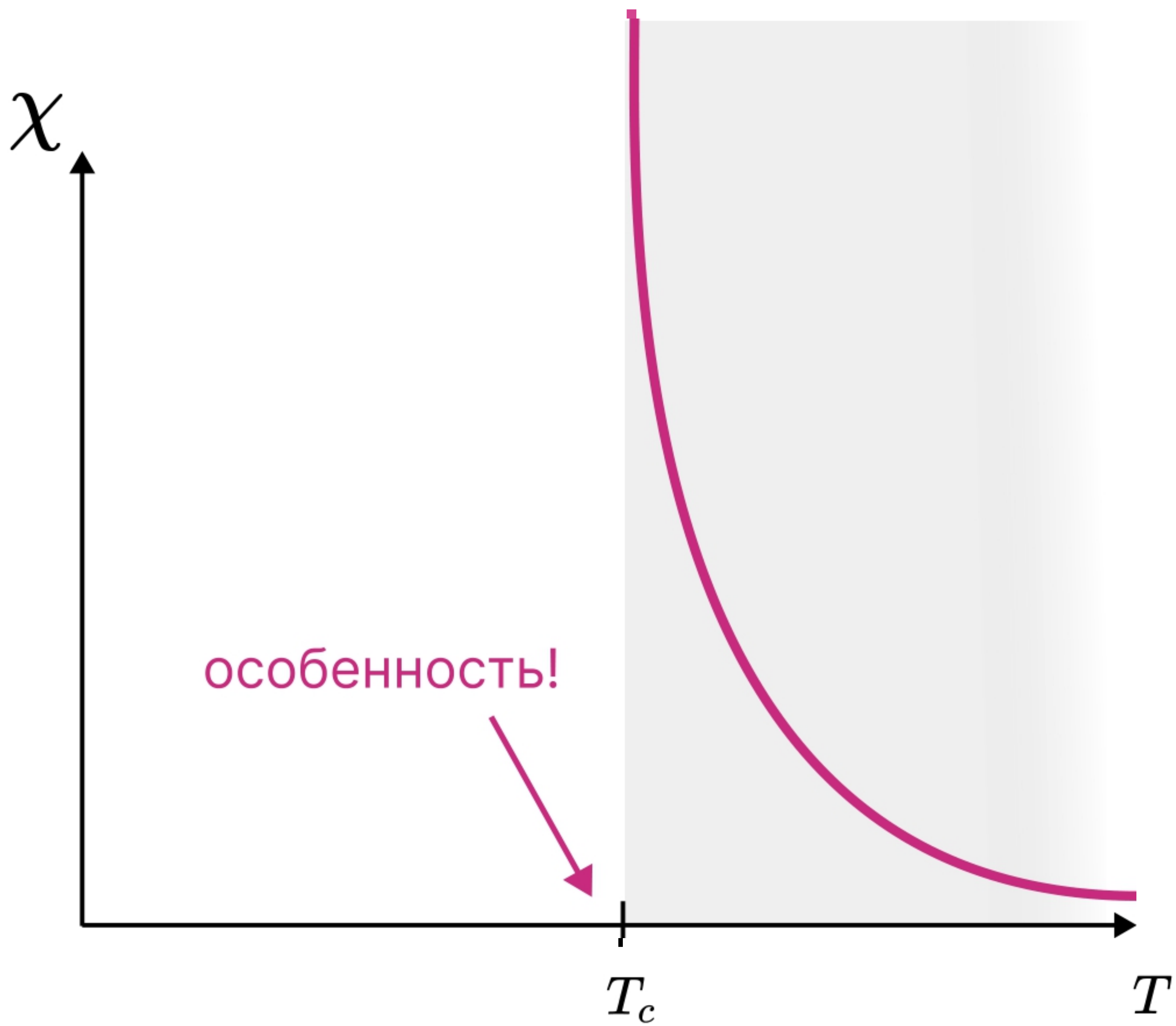
$$M = \chi(B + B_E)$$

$$\downarrow$$

$$\chi = \frac{B}{M} = \frac{C}{T - C\lambda}$$

ФМ переход

$T_c < T$



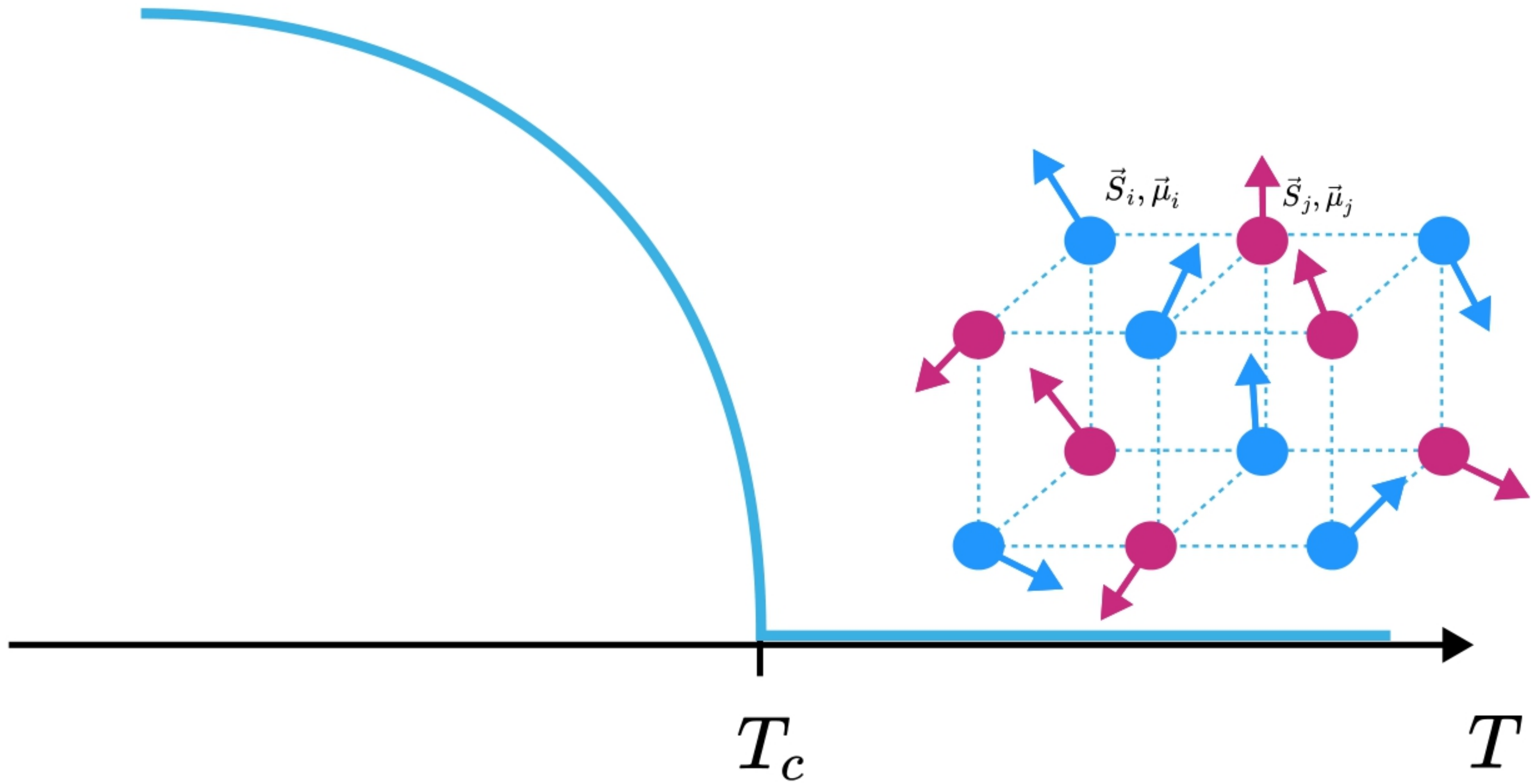
Закон
Кюри-Вейсса

$$\chi = \frac{B}{M} = \frac{C}{T - C\lambda}$$

антиферромагнитный порядок

$J > 0$

$\vec{S}_{tot} \to min$



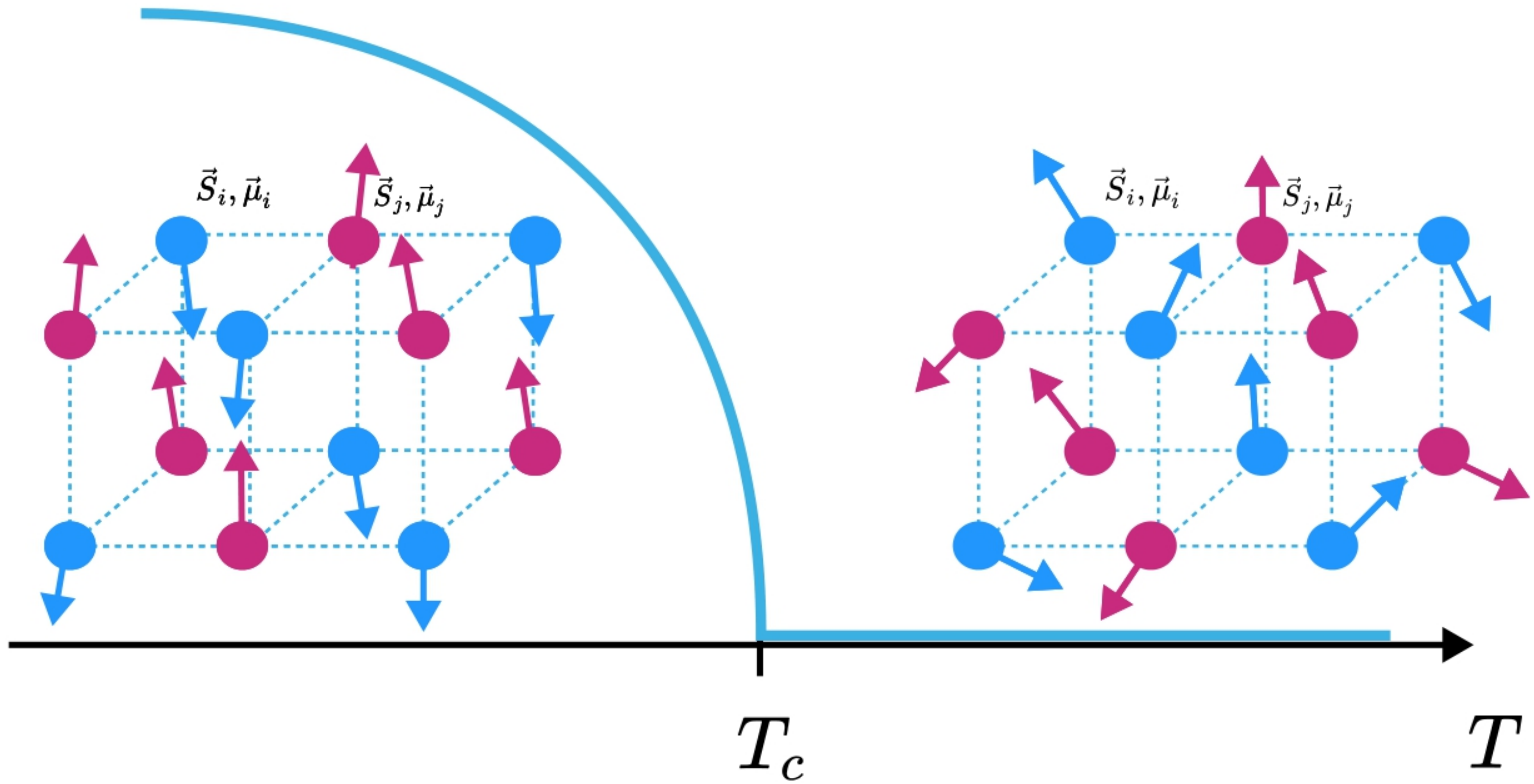
параметр порядка = 0

антиферромагнитный порядок

$J > 0$

$\downarrow$

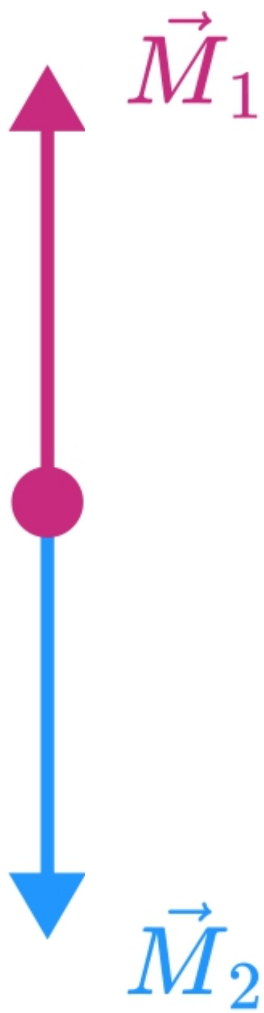
$\vec{S}_{tot} \to min$



$$\vec{L} = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 \neq 0$$

$$\vec{L} = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 = 0$$

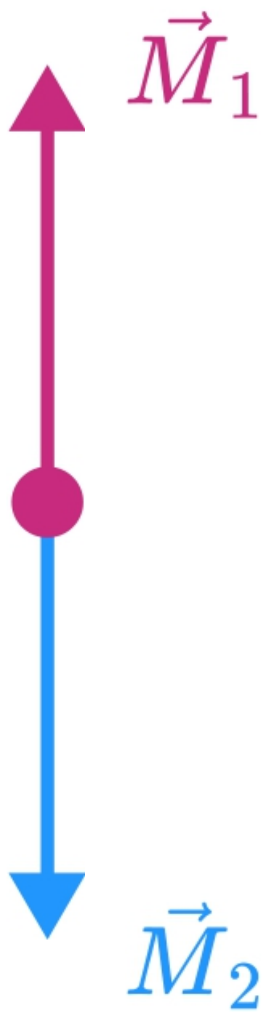
подрешётки



$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 = 0$$

$$\vec{L} = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 \neq 0$$

АФМ переход

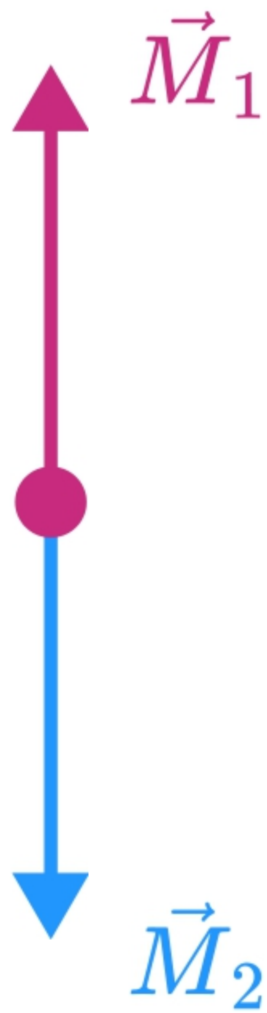


приближение среднего поля
отдельно для каждой подрешетки:

$$\vec{B}_1 = -\eta \vec{M}_1$$

$$\vec{B}_2 = -\eta \vec{M}_2$$

АФМ переход



из аналогичных соображений:

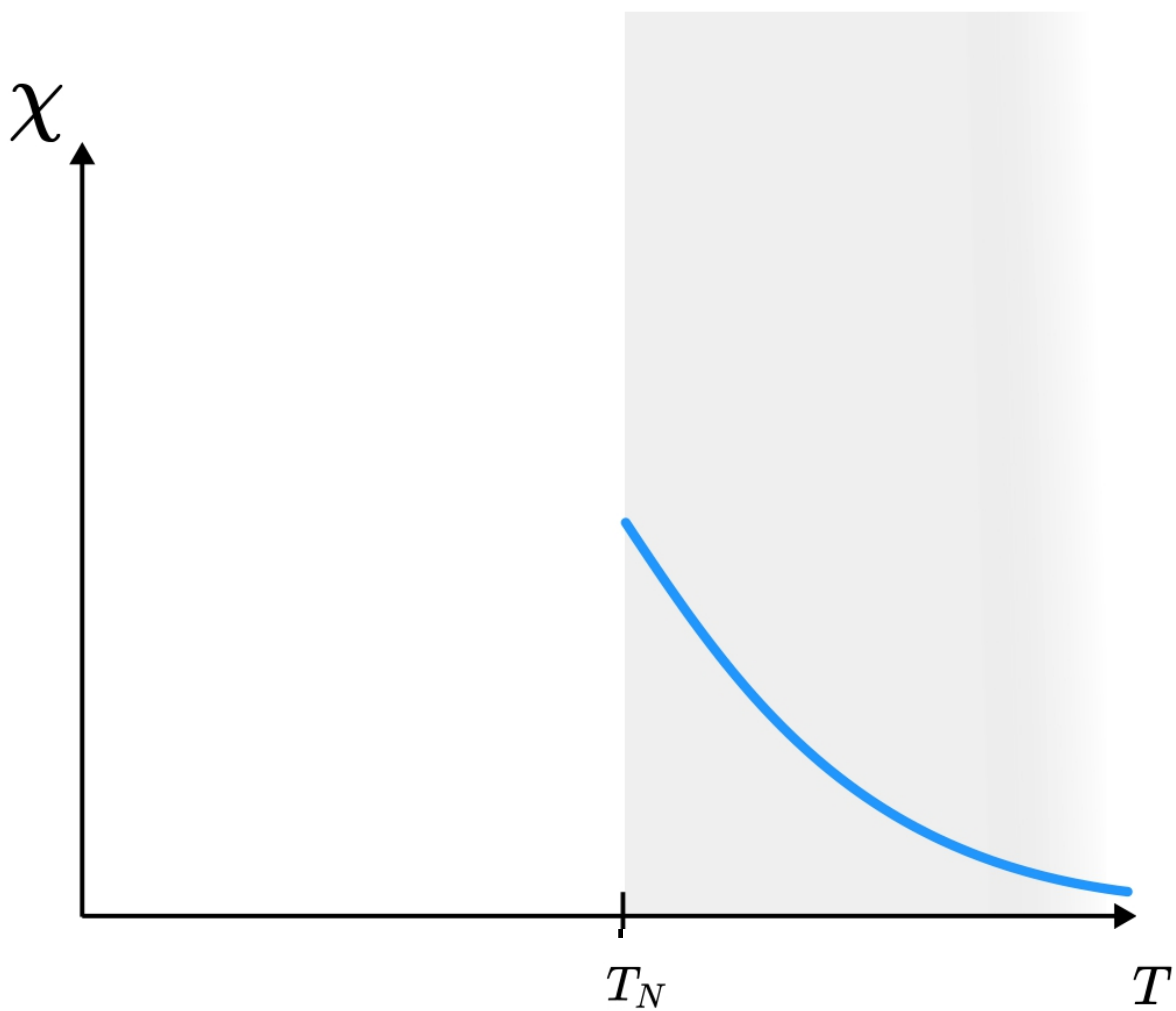
$$M_1 = \frac{C}{T}(B - \eta M_1)$$

$$M_2 = \frac{C}{T}(B - \eta M_2)$$

$$\chi = \frac{M_1 + M_2}{B} = 2\frac{CT - \eta C^2}{T^2 - T_c^2} = \frac{2C}{T + \eta C} = \frac{2C}{T + T_N}$$

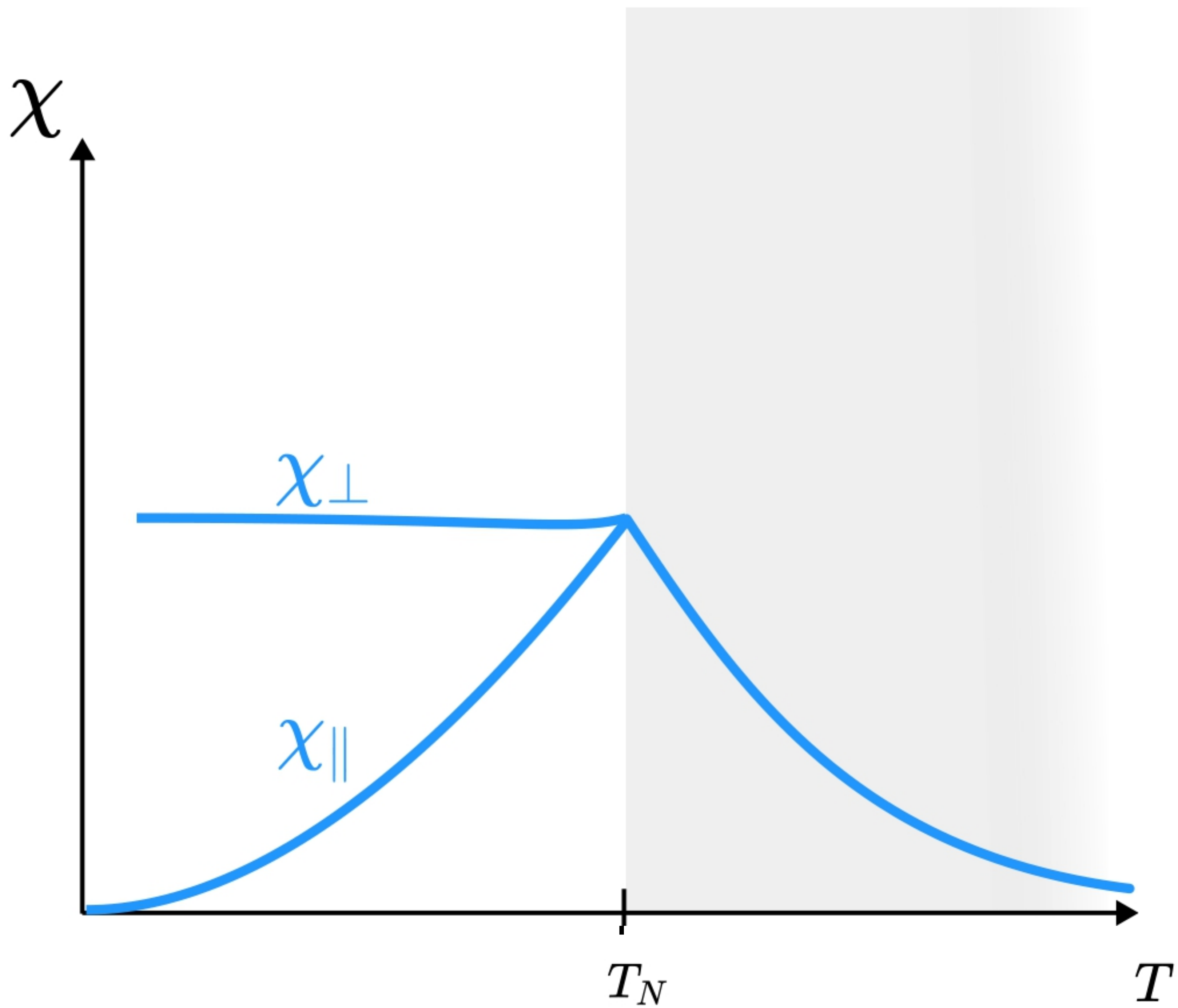
АФМ переход

$T_c < T$

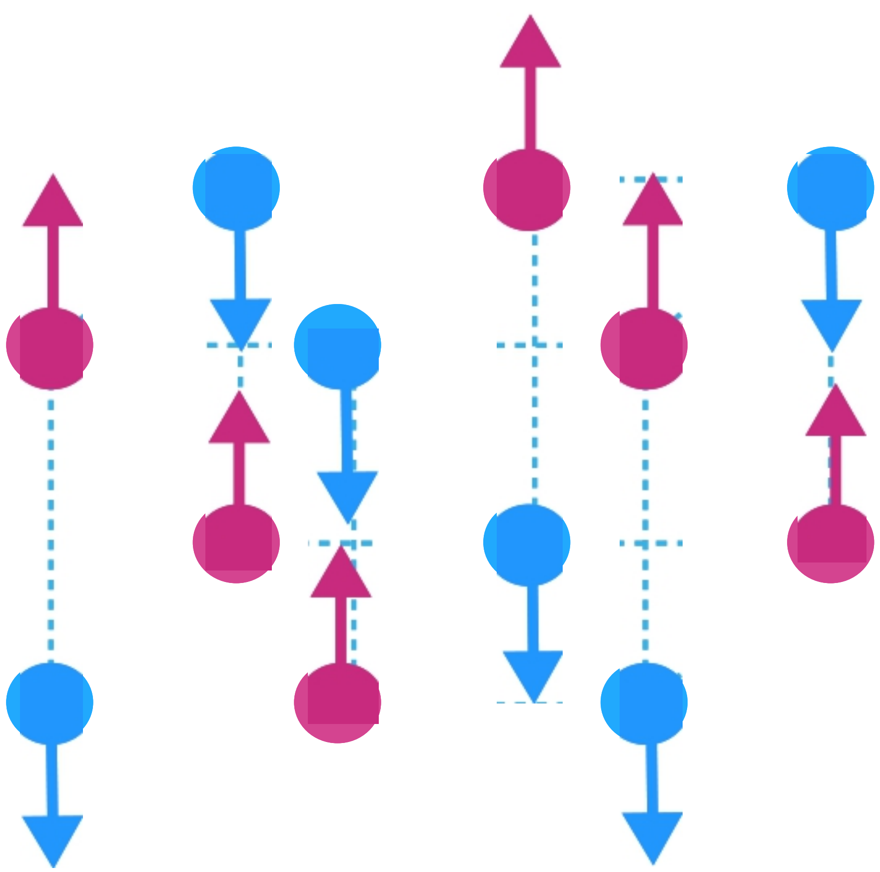


$$\chi = \frac{2C}{T + T_N}$$

АФМ переход

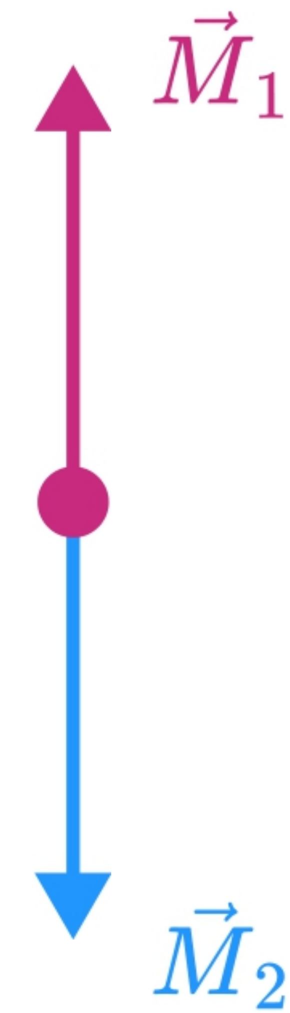


как устроена динамика упорядоченной системы?



$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 = 0$$

$$\vec{L} = \vec{M}_1 - \vec{M}_2 \neq 0$$



уравнения движения

$$\frac{d\vec{M}_1}{dt} = \gamma \vec{M}_1 \times \vec{H}_E^1$$

$$\frac{d\vec{M}_2}{dt} = \gamma \vec{M}_2 \times \vec{H}_E^2$$

$$\Big\downarrow$$

$$(\vec{M}_\alpha/\gamma)^2 = \text{const}$$

эффективное поле

$$\frac{d\vec{M}_1}{dt} = \gamma \vec{M}_1 \times \vec{H}_E^1$$

$$\frac{d\vec{M}_2}{dt} = \gamma \vec{M}_2 \times \vec{H}_E^2$$

$$\vec{H}_E^\alpha = -\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}_\alpha}$$

$$(\vec{M}_\alpha/\gamma)^2 = \text{const}$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

решение

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

ищем

в виде

$$\vec{M} = \vec{m}_0 + \vec{m}$$

$$\vec{L} = \vec{l}_0 + \vec{l}$$

$$\vec{m} = m \cdot e^{-i(2\pi\nu_k t)}$$

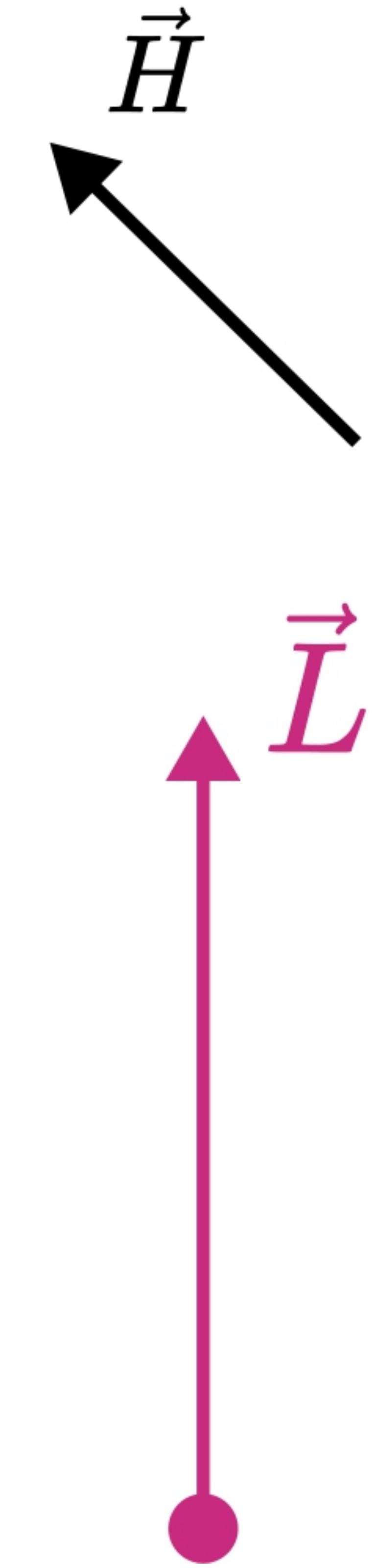
$$\vec{l} = l \cdot e^{-i(2\pi\nu_k t)}$$

и получаем частоты ν_k

изотропный случай

термодинамический потенциал

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$



изотропный случай

термодинамический потенциал

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} = B\vec{M} + D(\vec{L}\vec{M})\vec{L} - \vec{H}$$

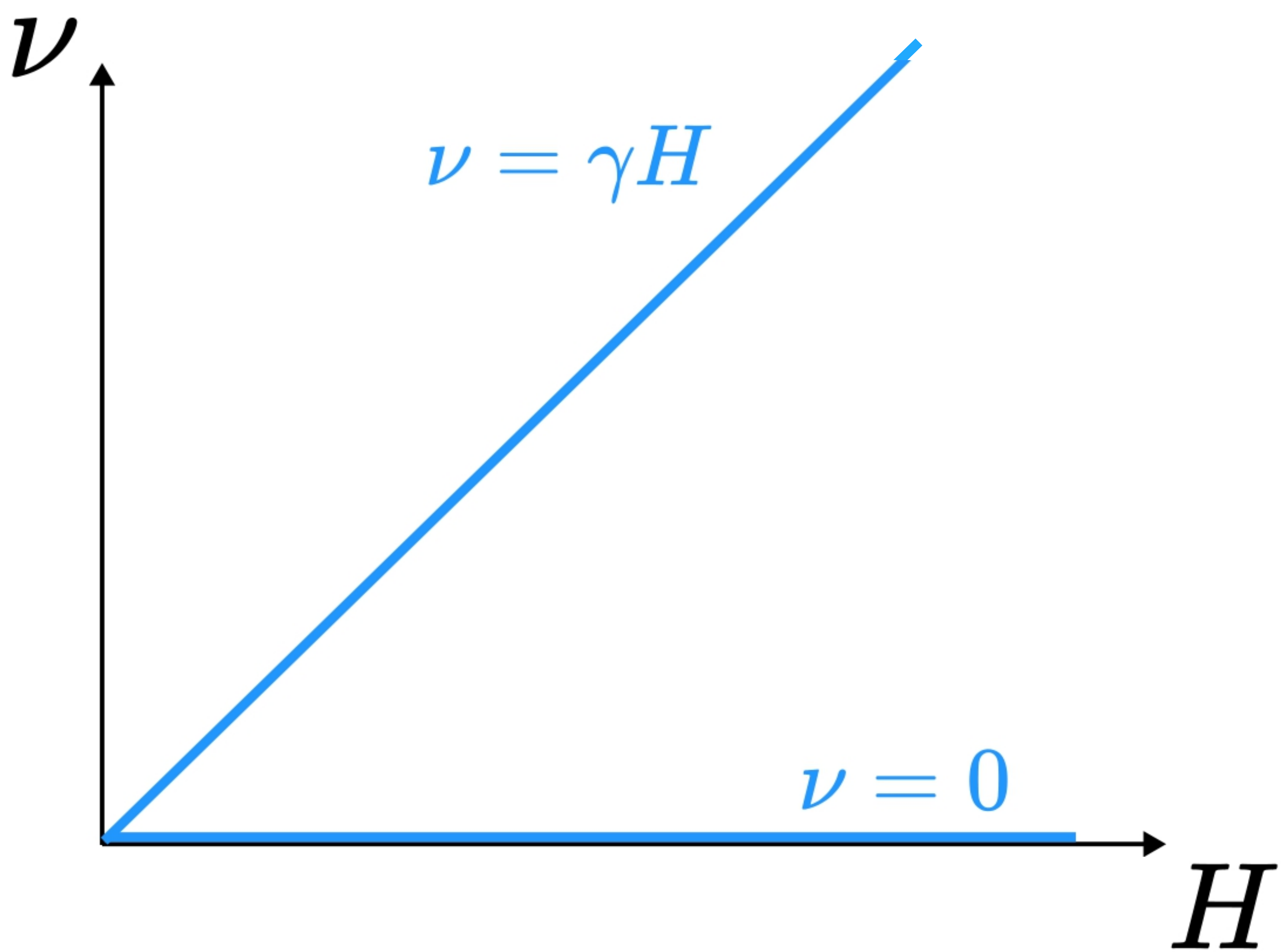
$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}} = +D(\vec{L}\vec{M})\vec{M}$$

$$\rightarrow$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \vec{M} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{M}} + \vec{L} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{L}}$$

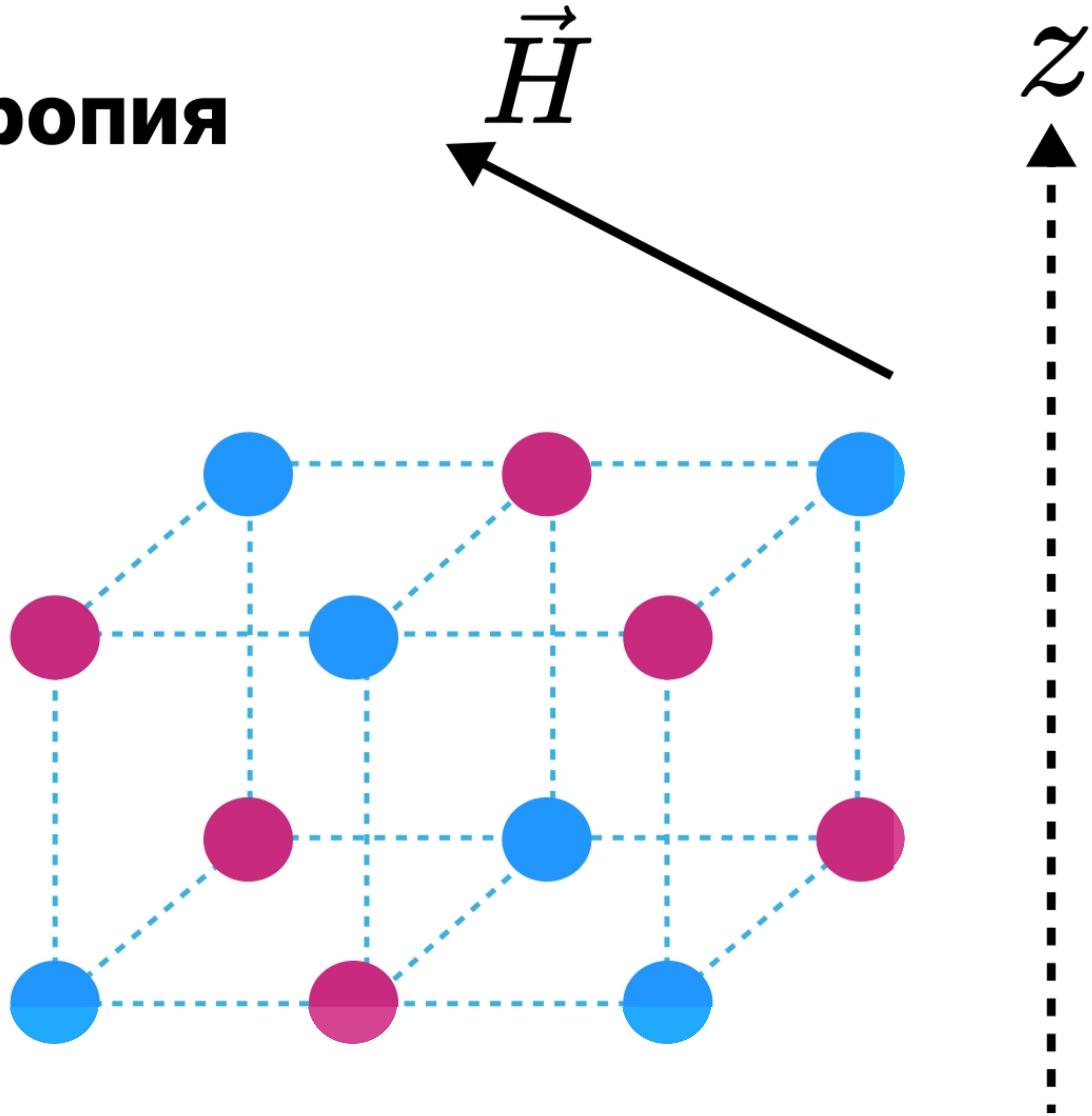
изотропный случай



анизотропия

орбитальный момент!

анизотропия



анизотропия

термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

анизотропия

термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

а что надо теперь надо дописать в “энергию”?

анизотропия

термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H} \boxed{-\frac{a}{2}L_z^2}$$

лёгкая ось: a > 0
лёгкая плоскость: a < 0

лёгкая ось (a > 0)

термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

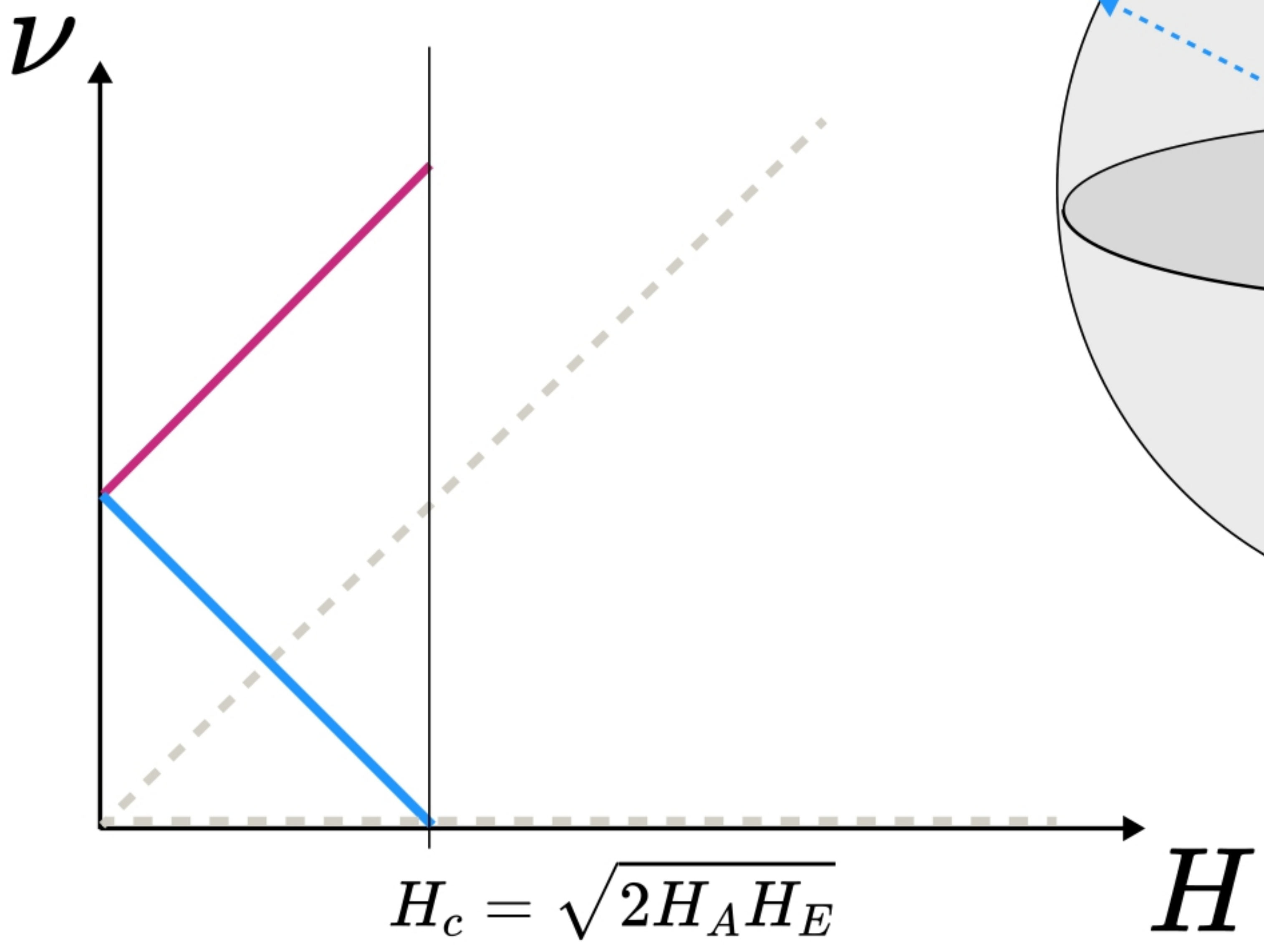
$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H} - \frac{a}{2}L_z^2$$

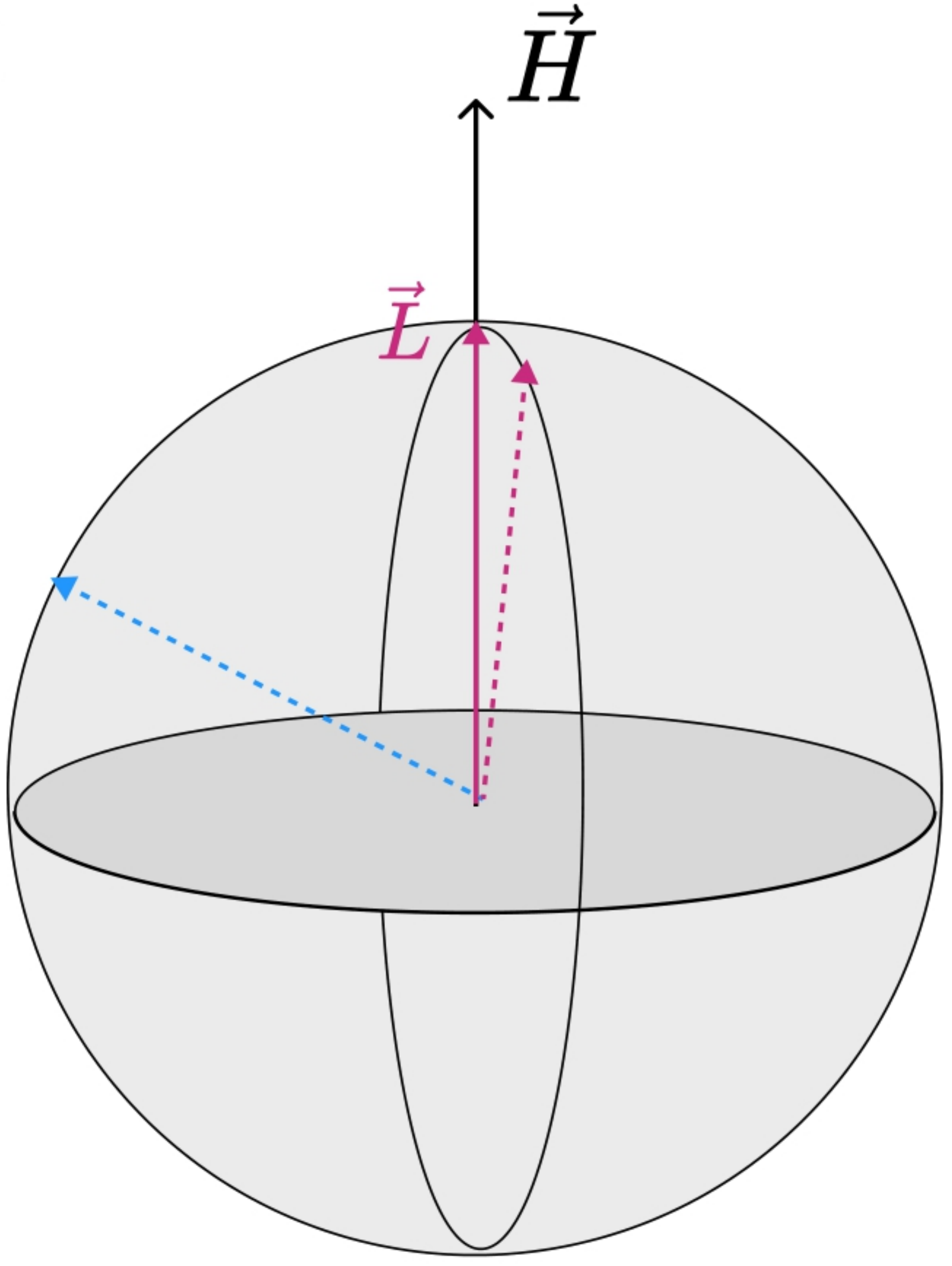
$$H_A = 2aM_0$$

$$H_E = BM_0$$

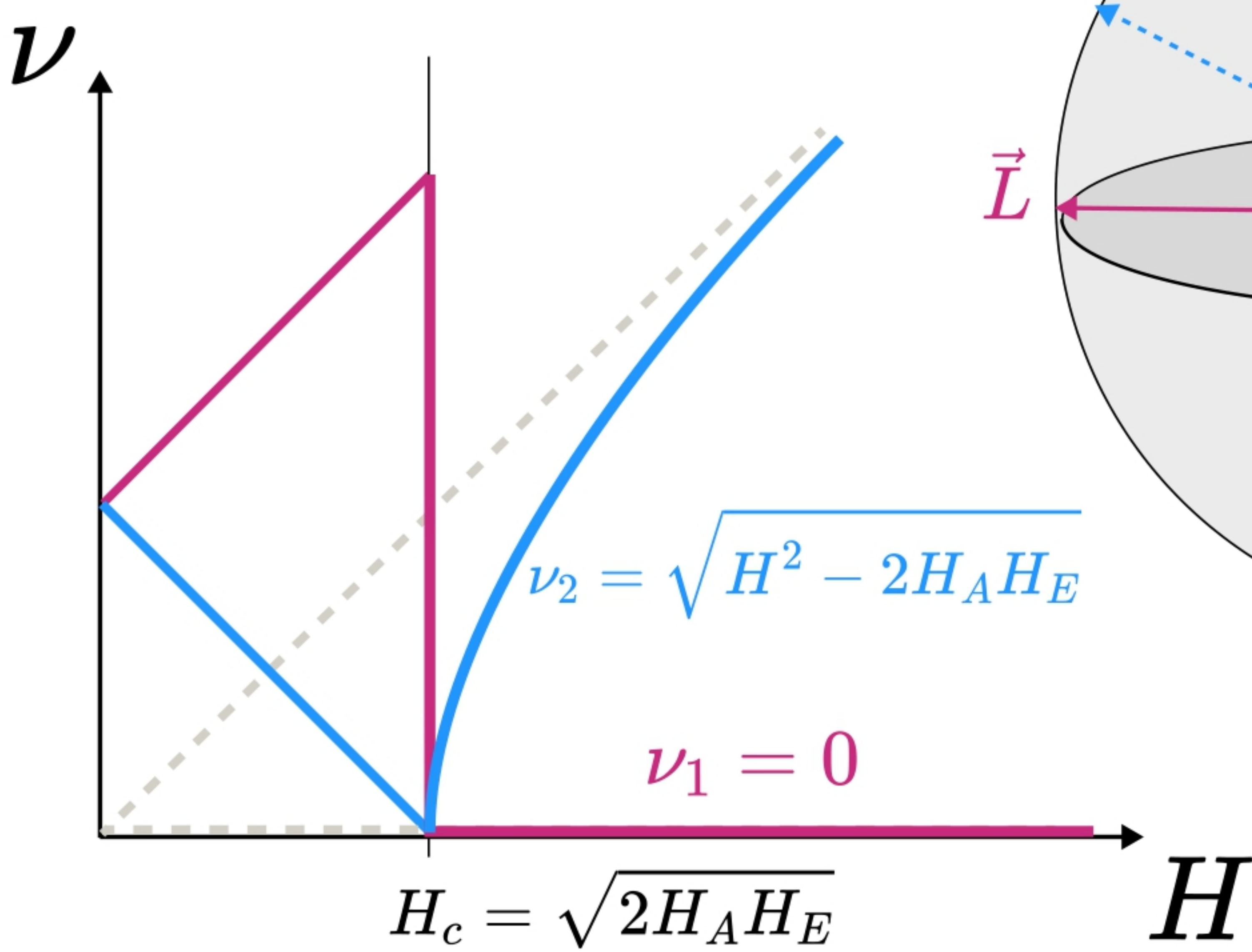
лёгкая ось: решения

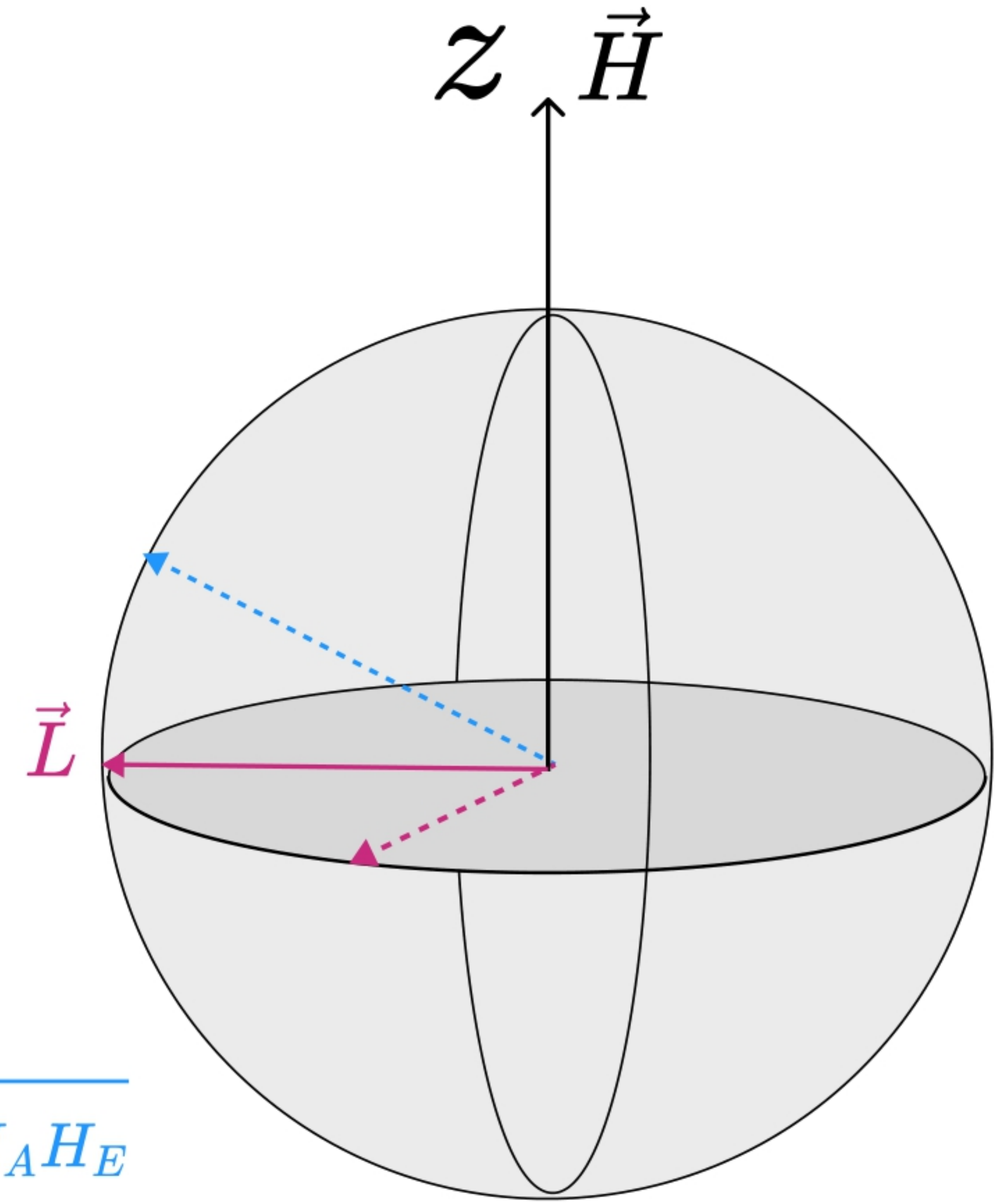
$$\nu_{1,2}/\gamma = \sqrt{2H_A H_E} \pm H$$



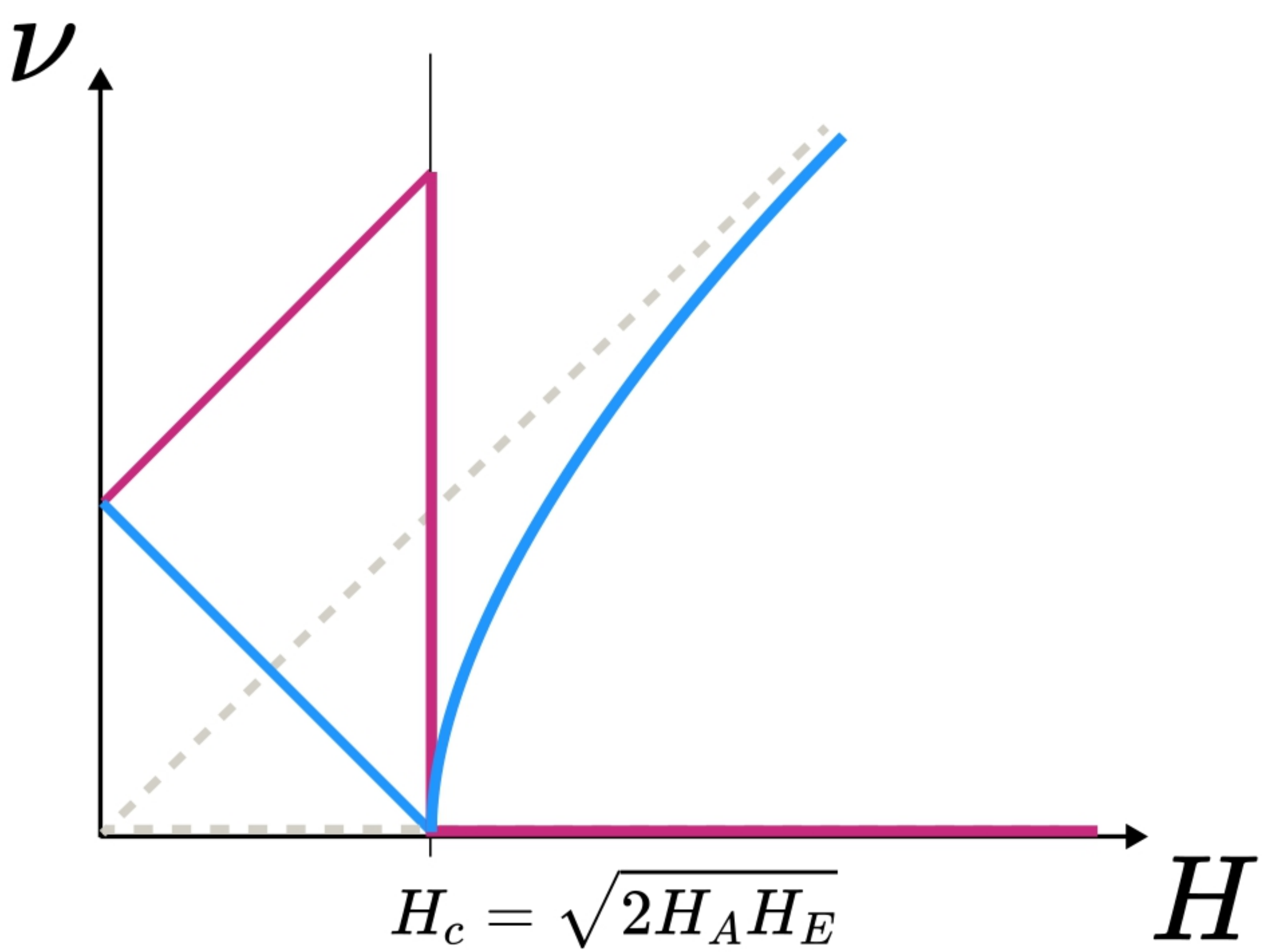


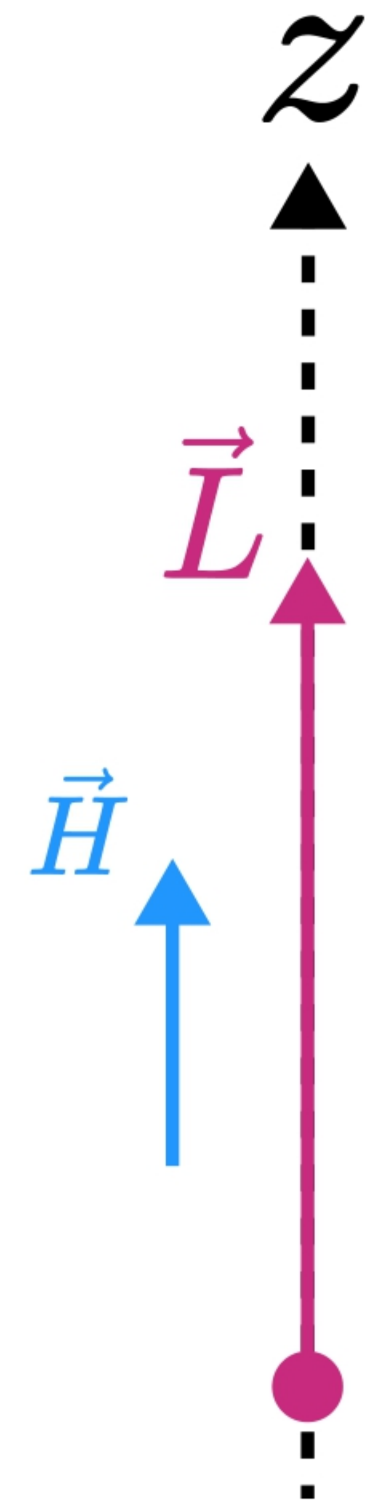
спин-флоп!





лёгкая ось: решения

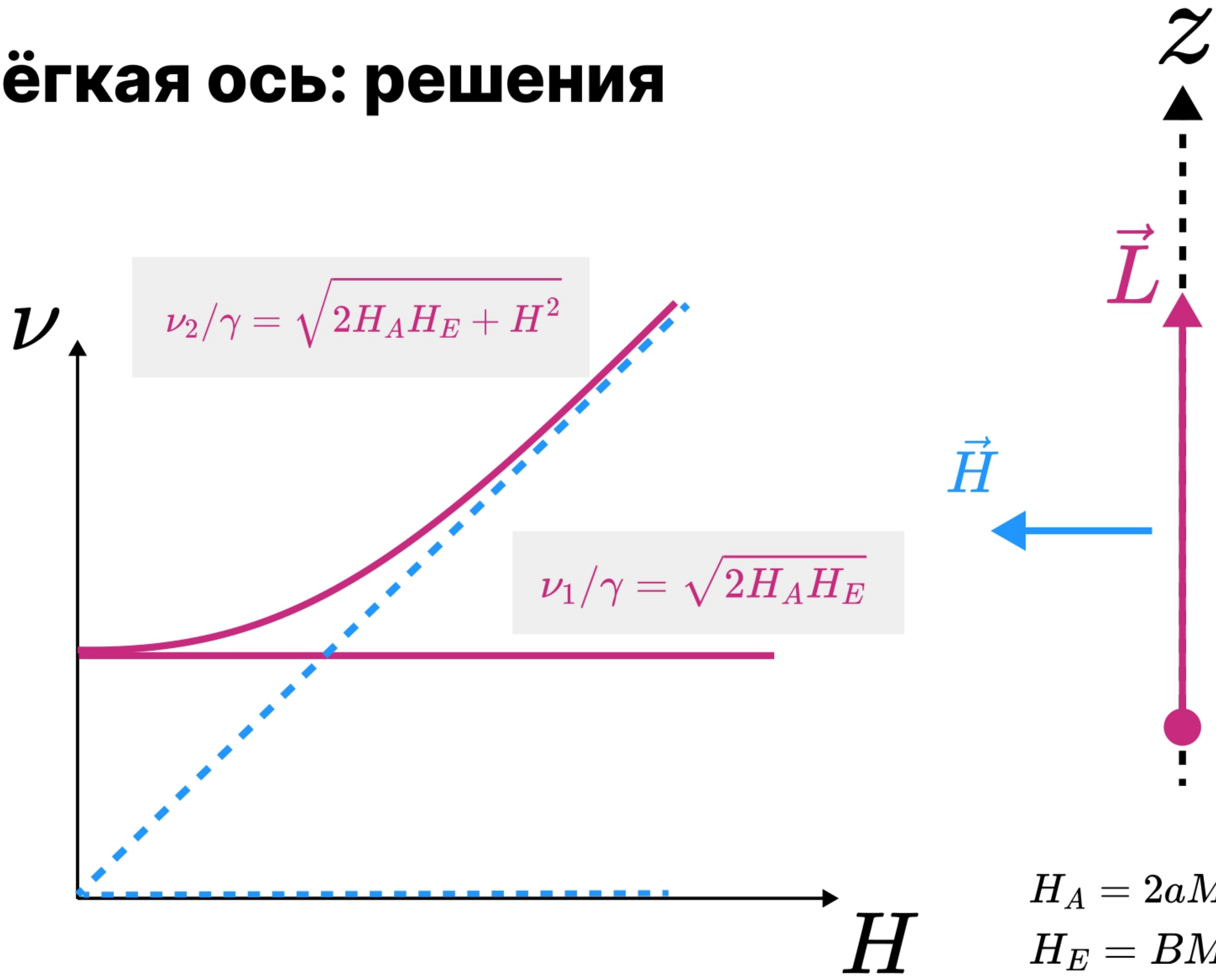




$H_A = 2aM_0$

$H_E = BM_0$

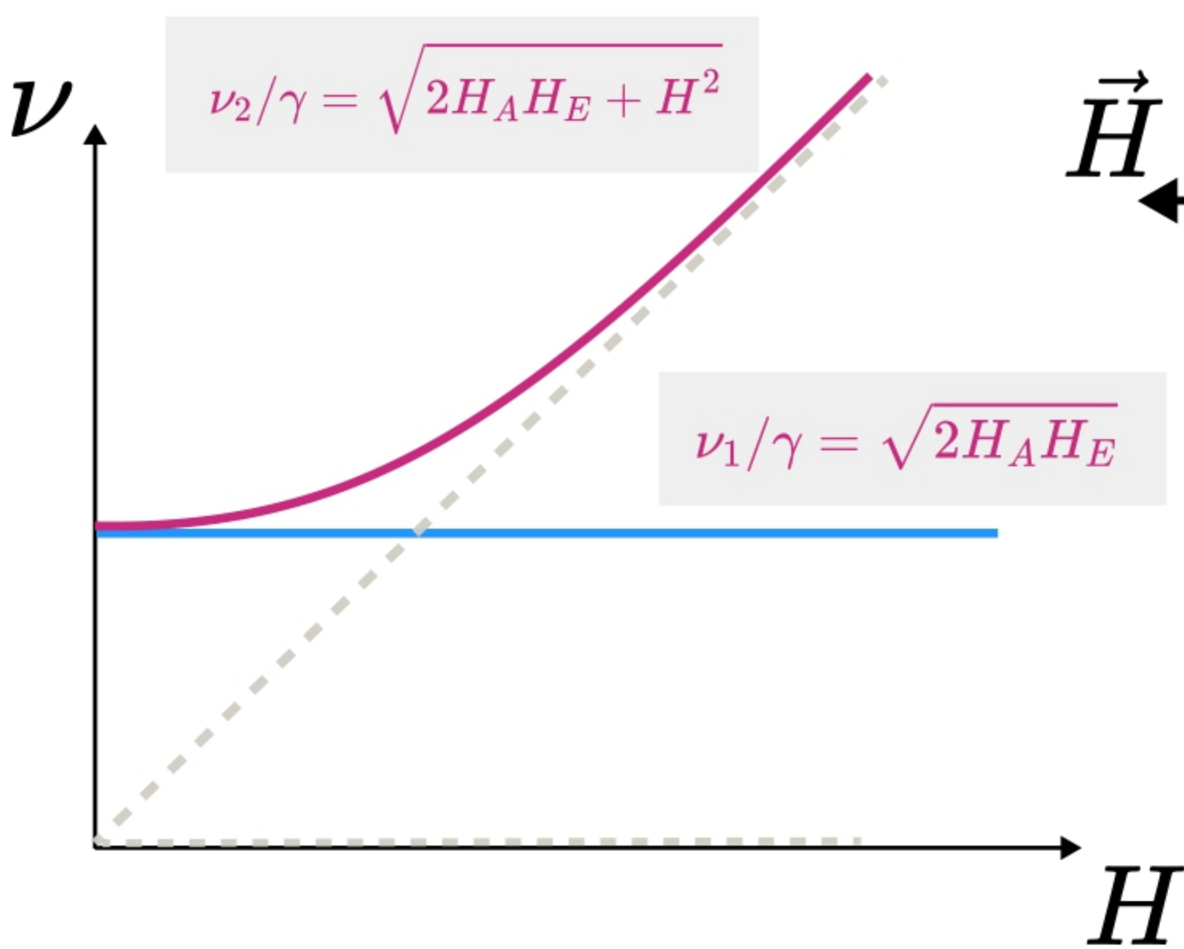
лёгкая ось: решения

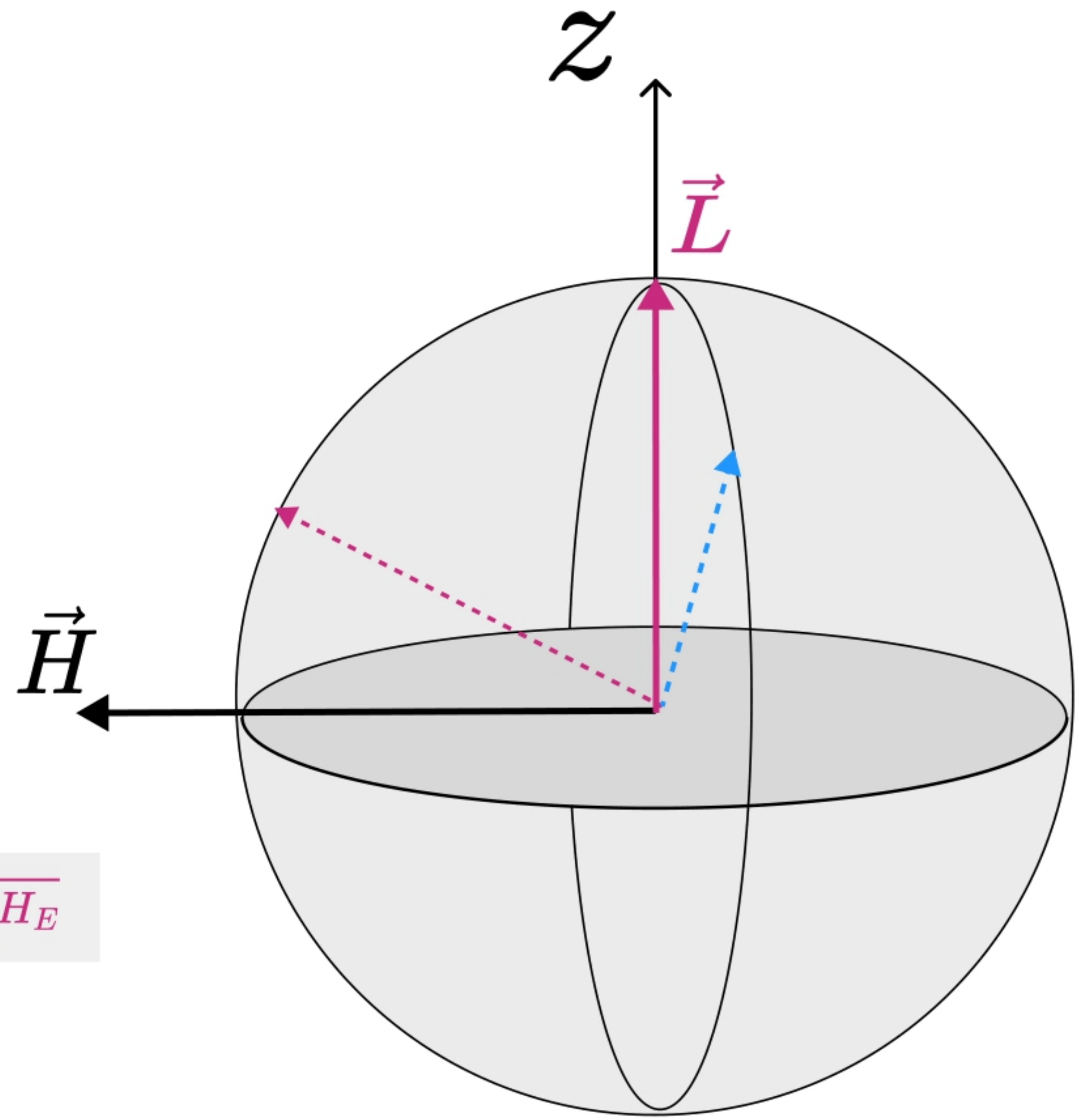


$H_A = 2aM_0$

$H_E = BM_0$

лёгкая ось: решения





лёгкая плоскость

термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

лёгкая плоскость (a < 0)

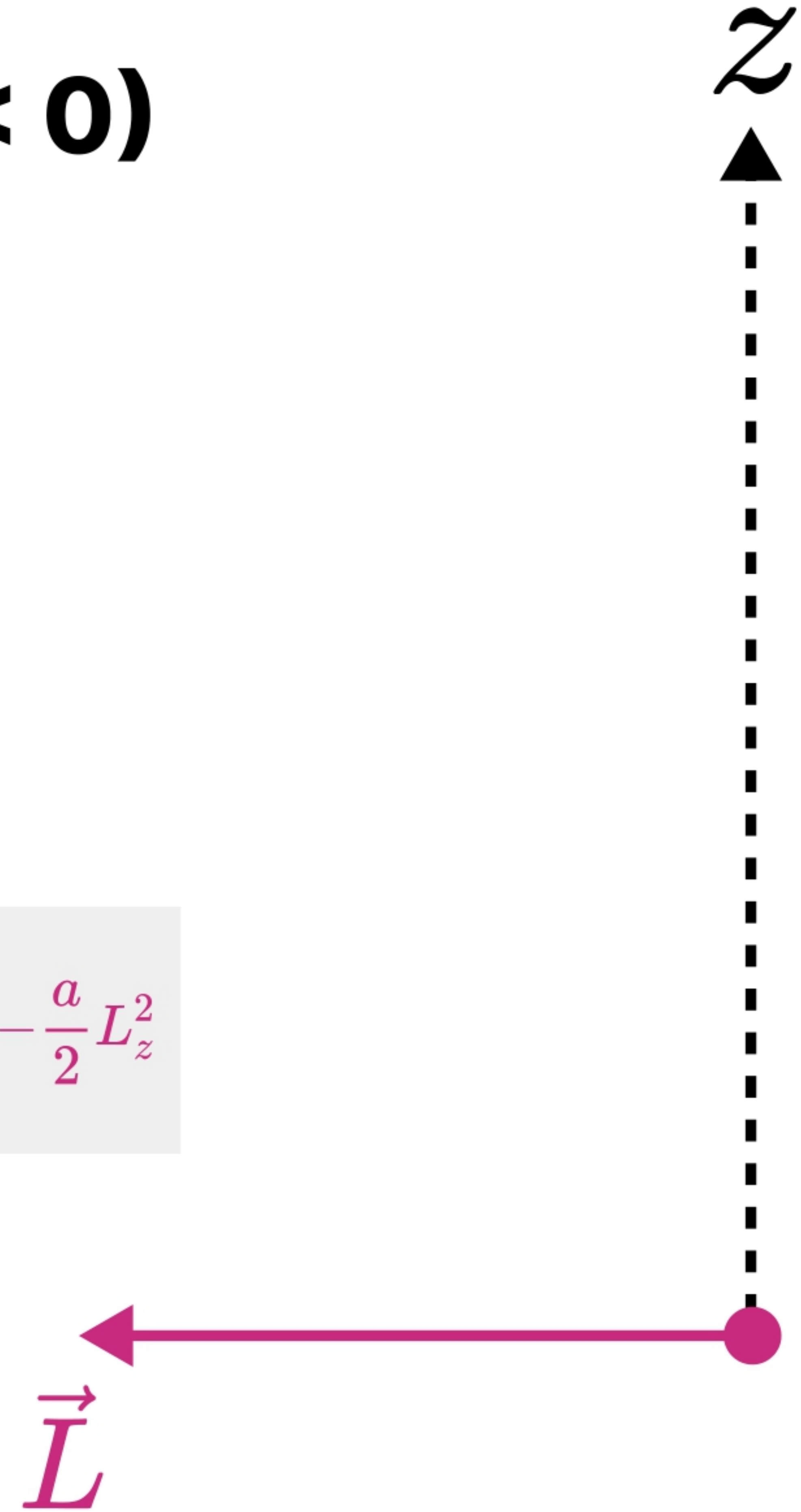
термодинамический потенциал для изотропного случая:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H}$$

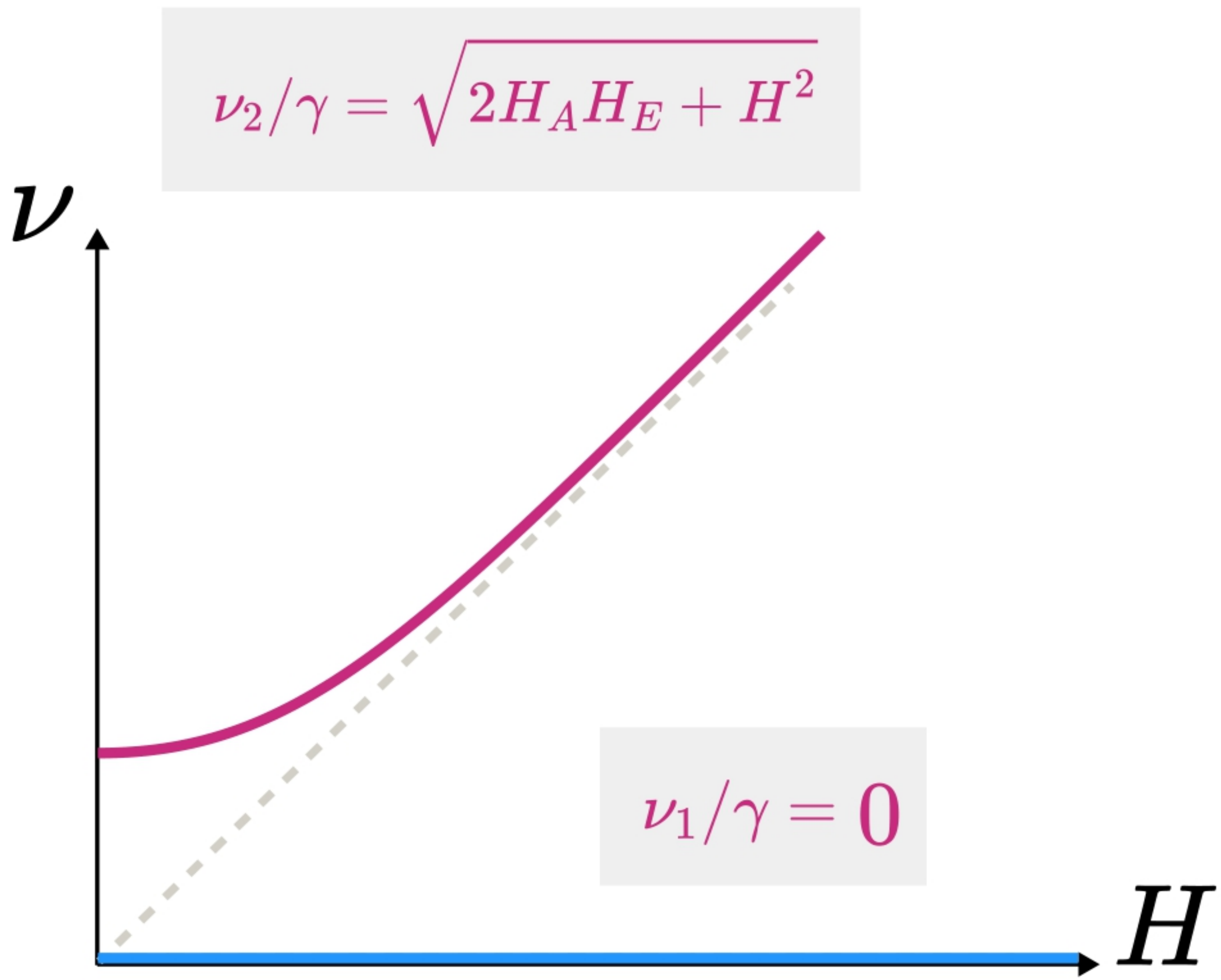
лёгкая плоскость:

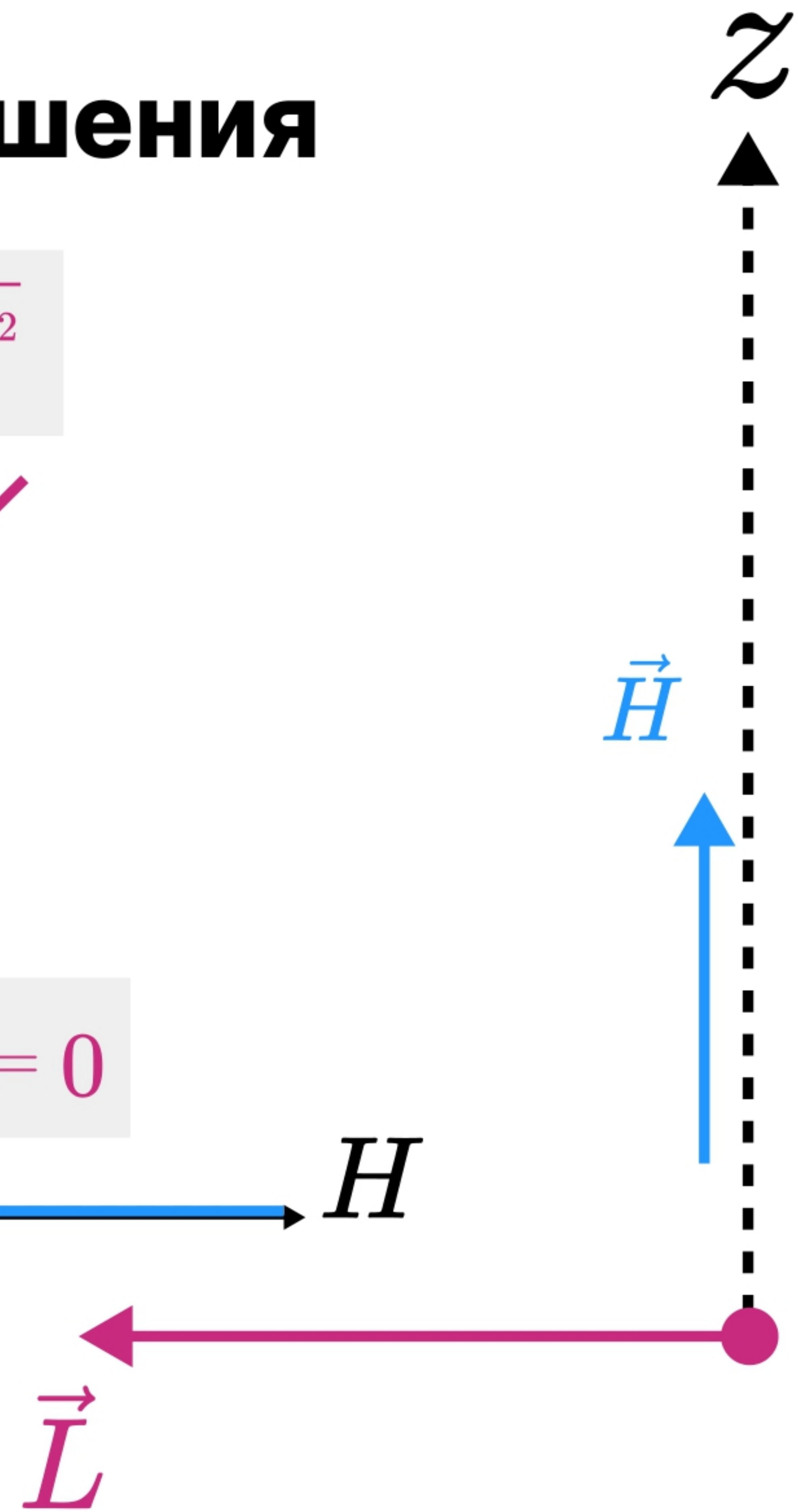
$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{2}\vec{L}^2 + \frac{B}{2}\vec{M}^2 + \frac{D}{2}(\vec{L}\vec{M})^2 - \vec{M}\vec{H} - \frac{a}{2}L_z^2$$

$$H_A = 2aM_0$$
$$H_E = BM_0$$



лёгкая плоскость: решения

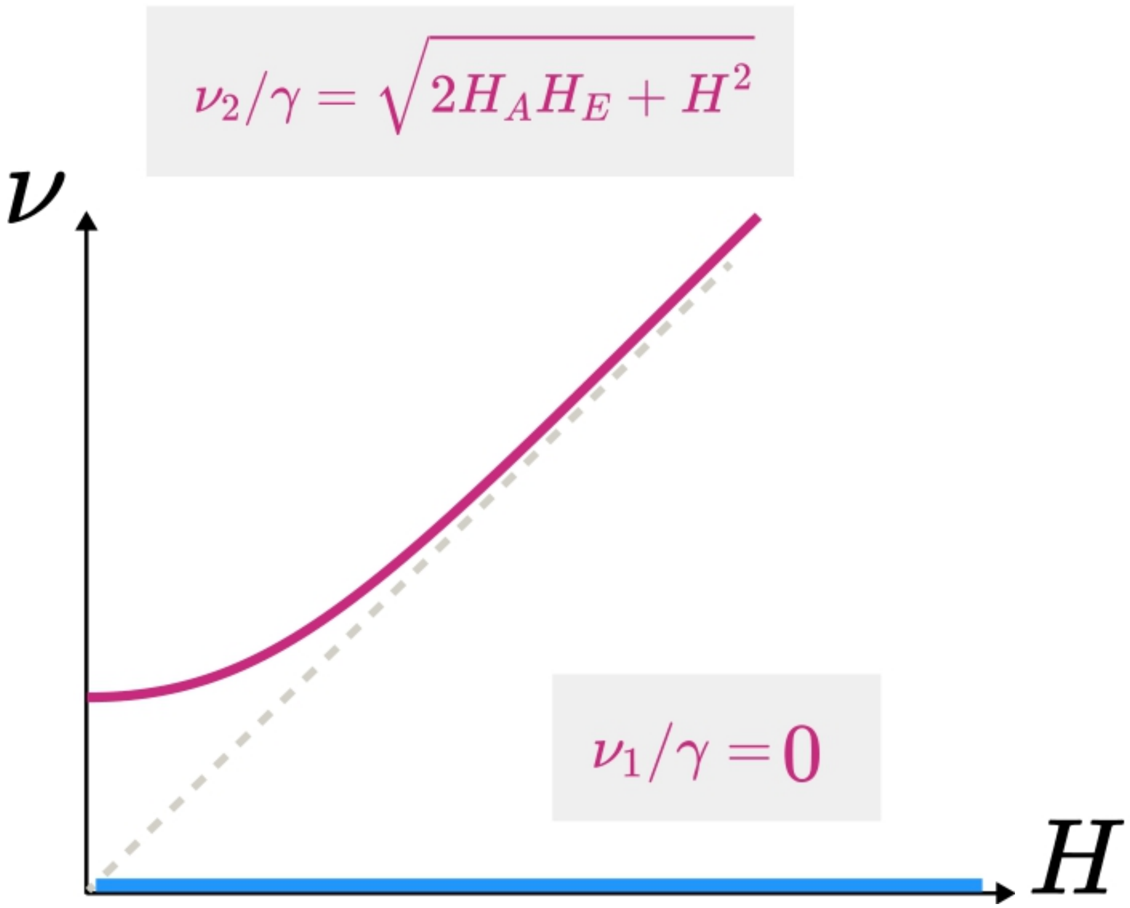


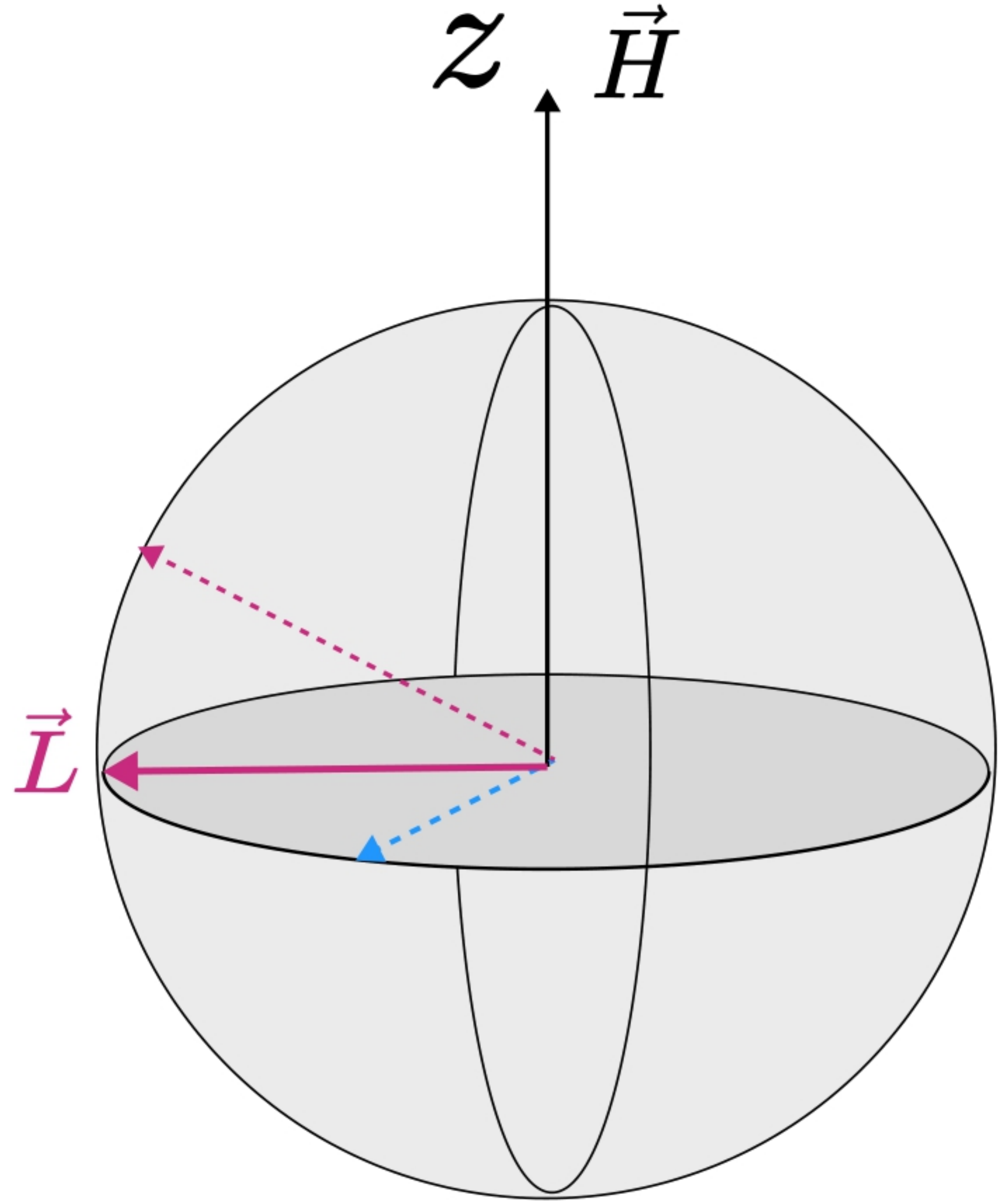


$H_A = 2aM_0$

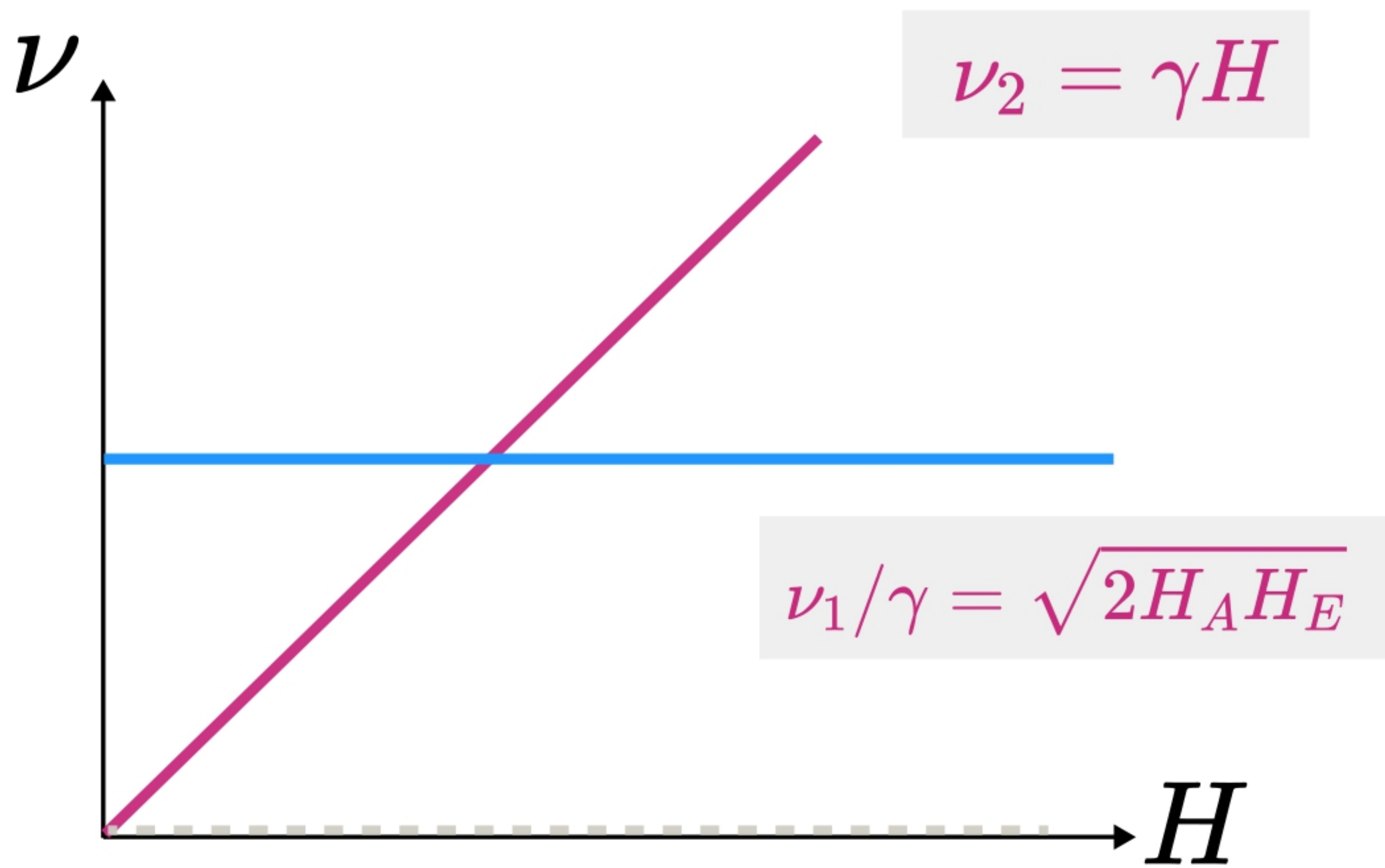
$H_E = BM_0$

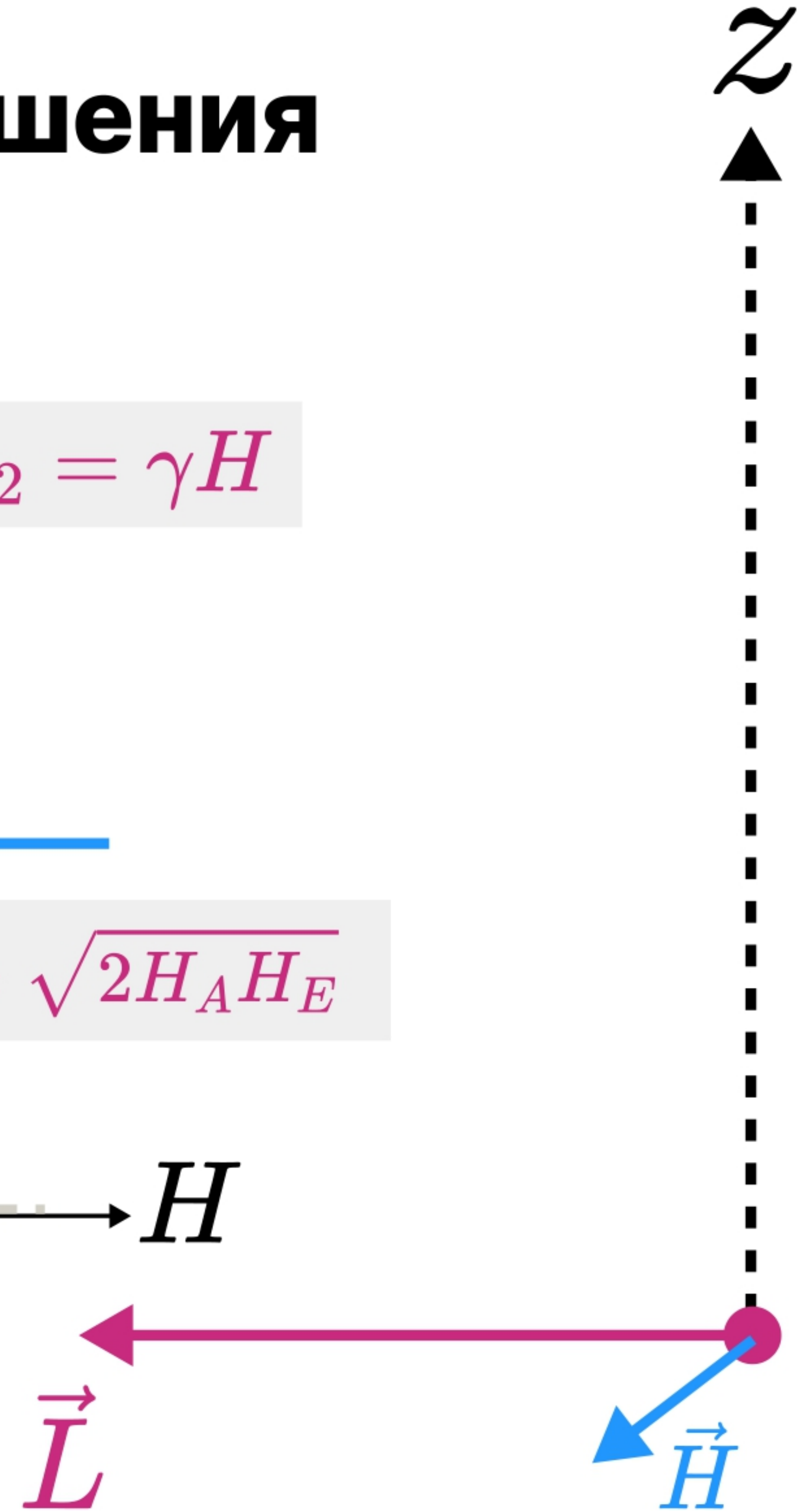
лёгкая плоскость: решения





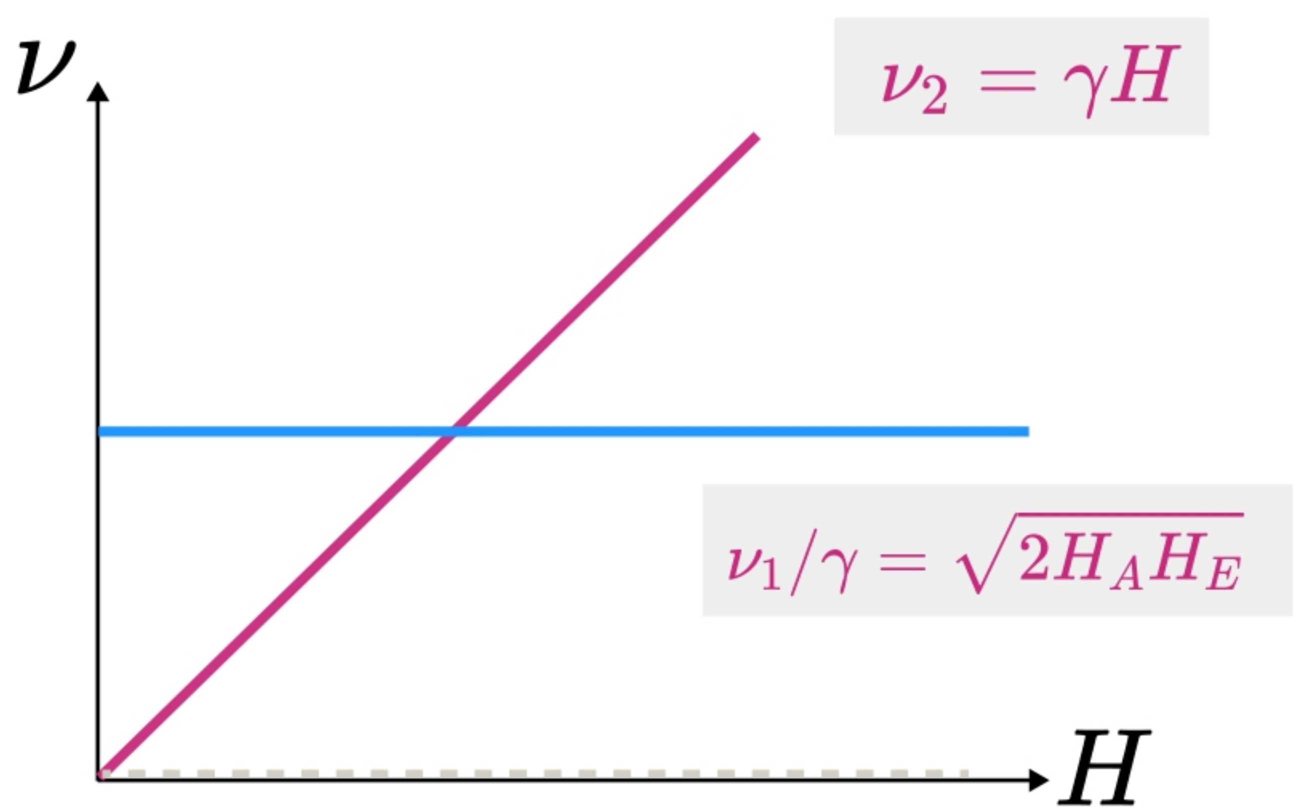
лёгкая плоскость: решения

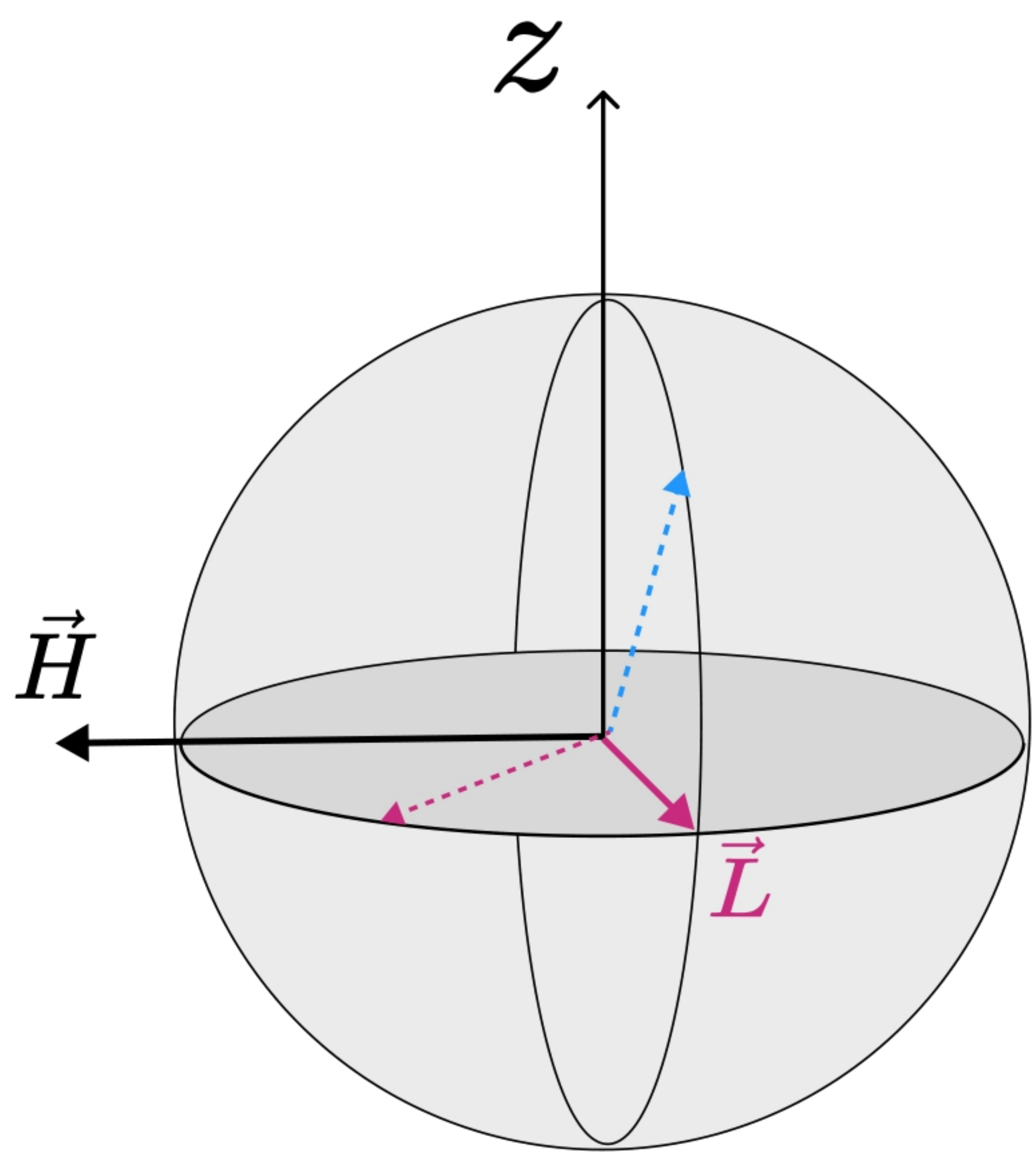




$$H_A = 2aM_0$$
$$H_E = BM_0$$

лёгкая плоскость: решения





легкая ось MnF_2

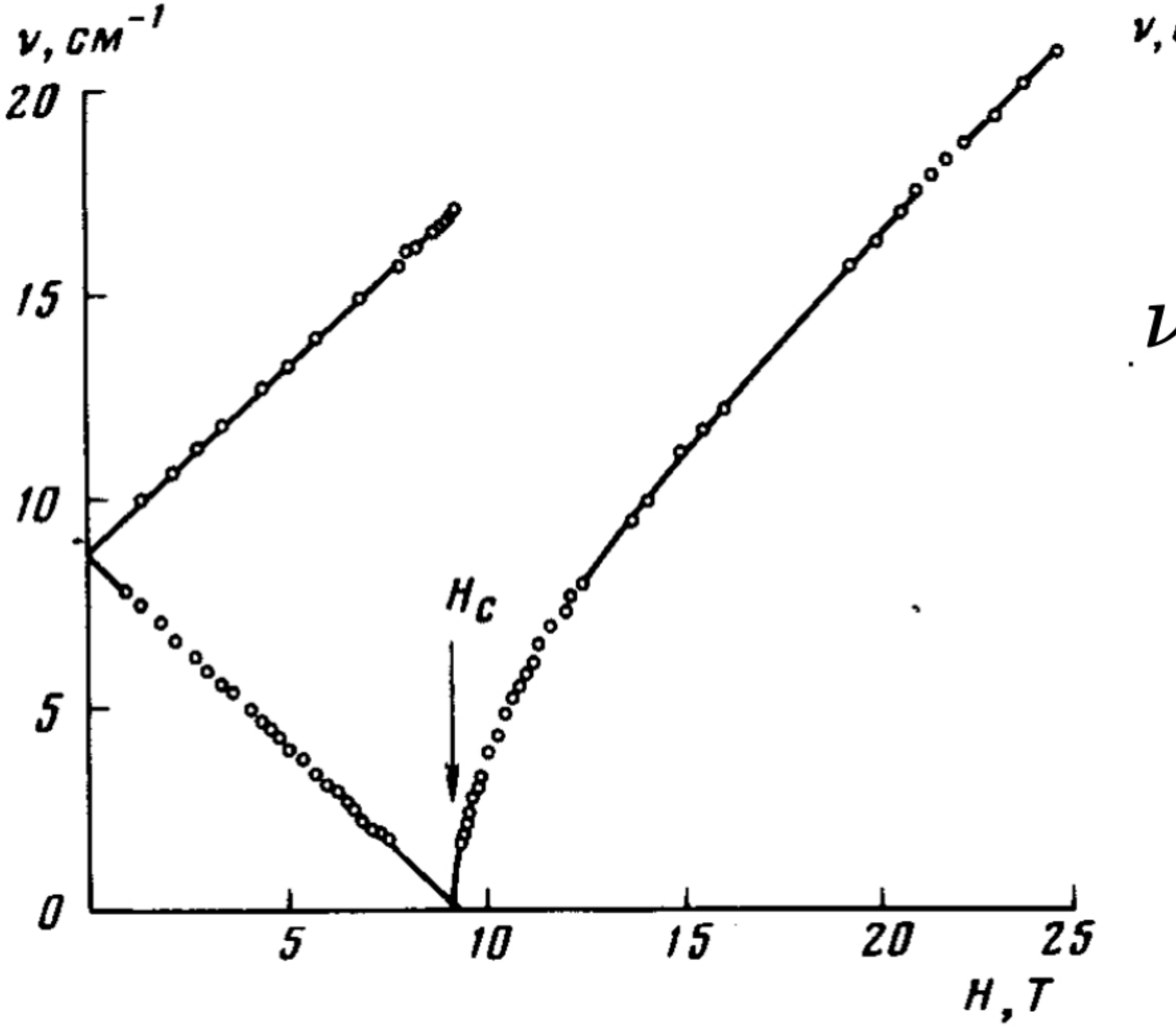
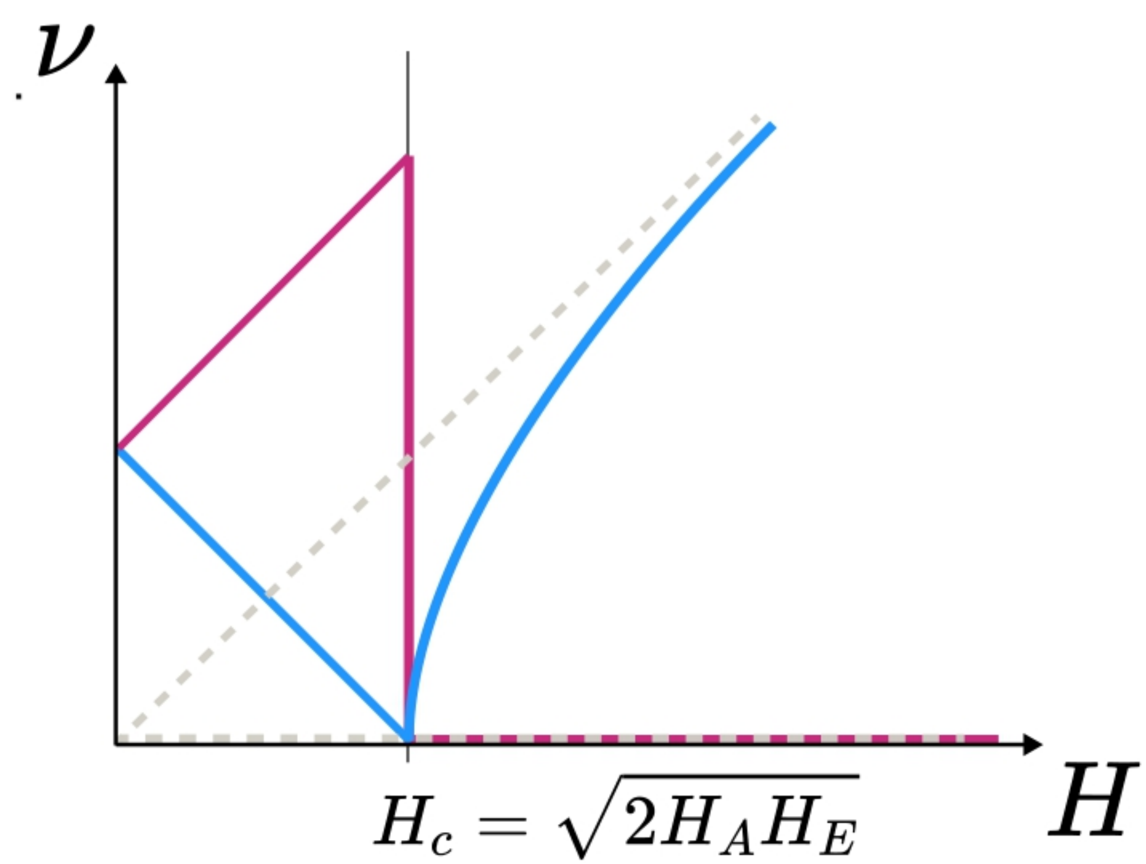


Рис.1

Рис. 1. Частотно-полевая зависимость АФМР в MnF_2 при $\psi = 0 \pm 1'$; сплошные линии – теория [7,8]



легкая плоскость $MnCO_3$

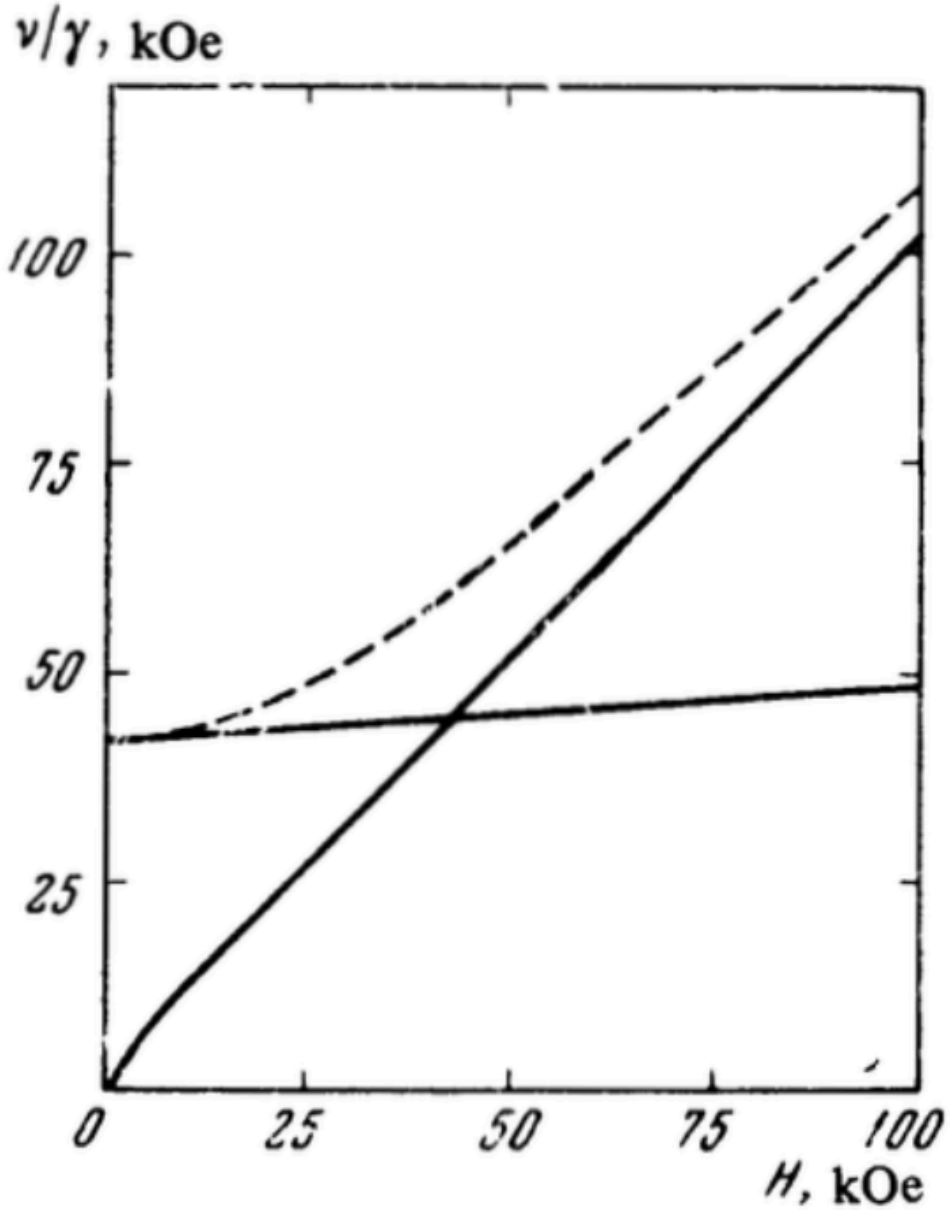
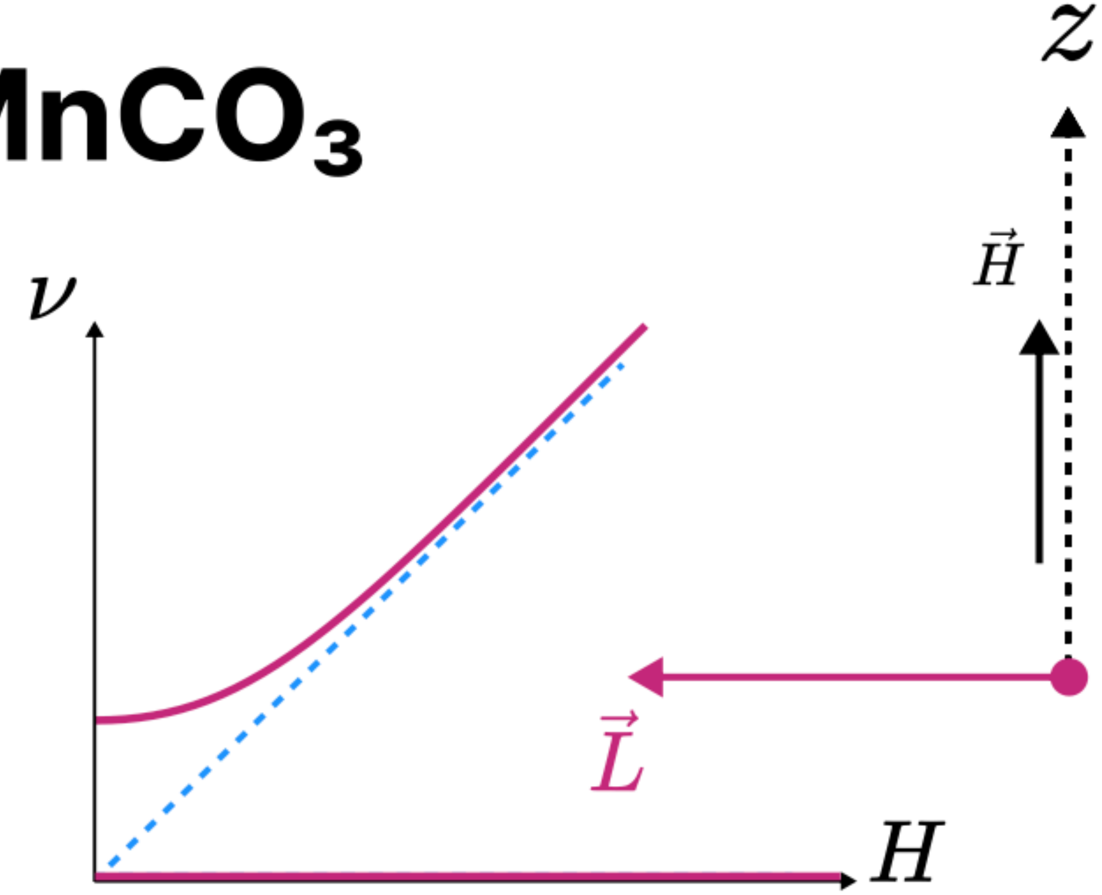
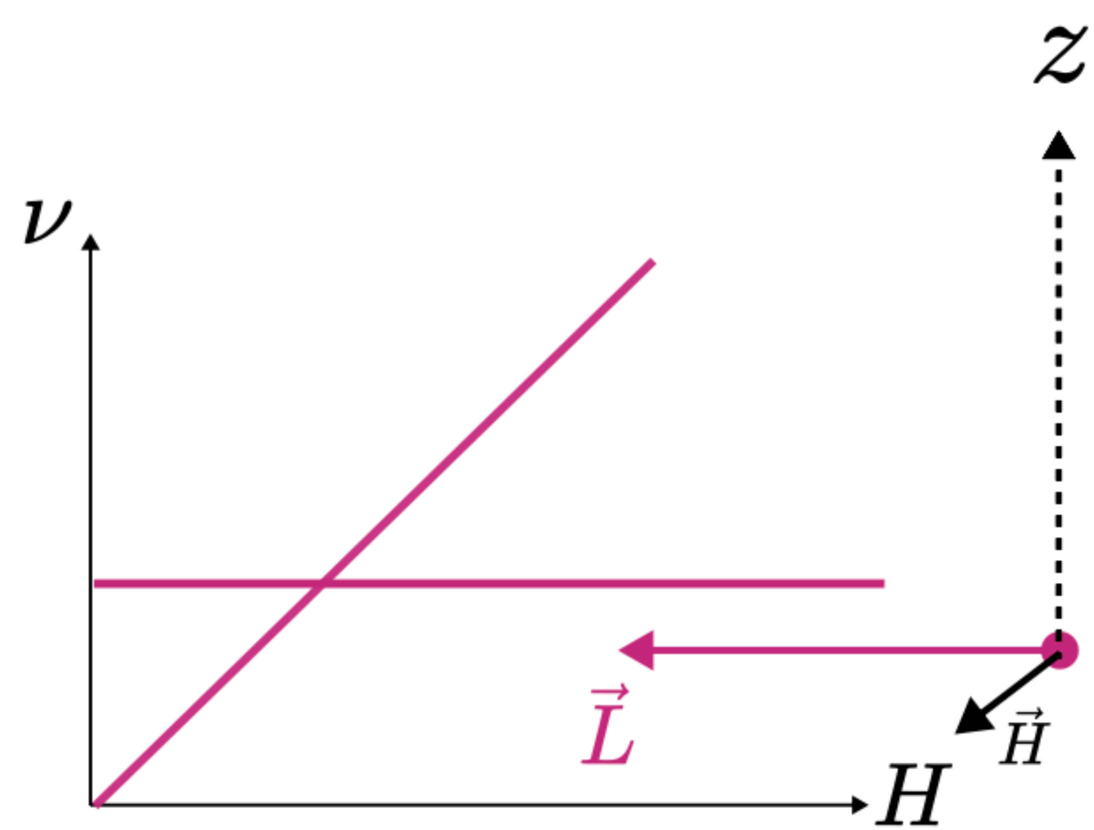


FIG. 1. Spectrum of AFMR in $MnCO_3$ at T = 4.2°K. Solid curves — **H**⊥z, dashed — **H**∥z.





ВСЁ!