

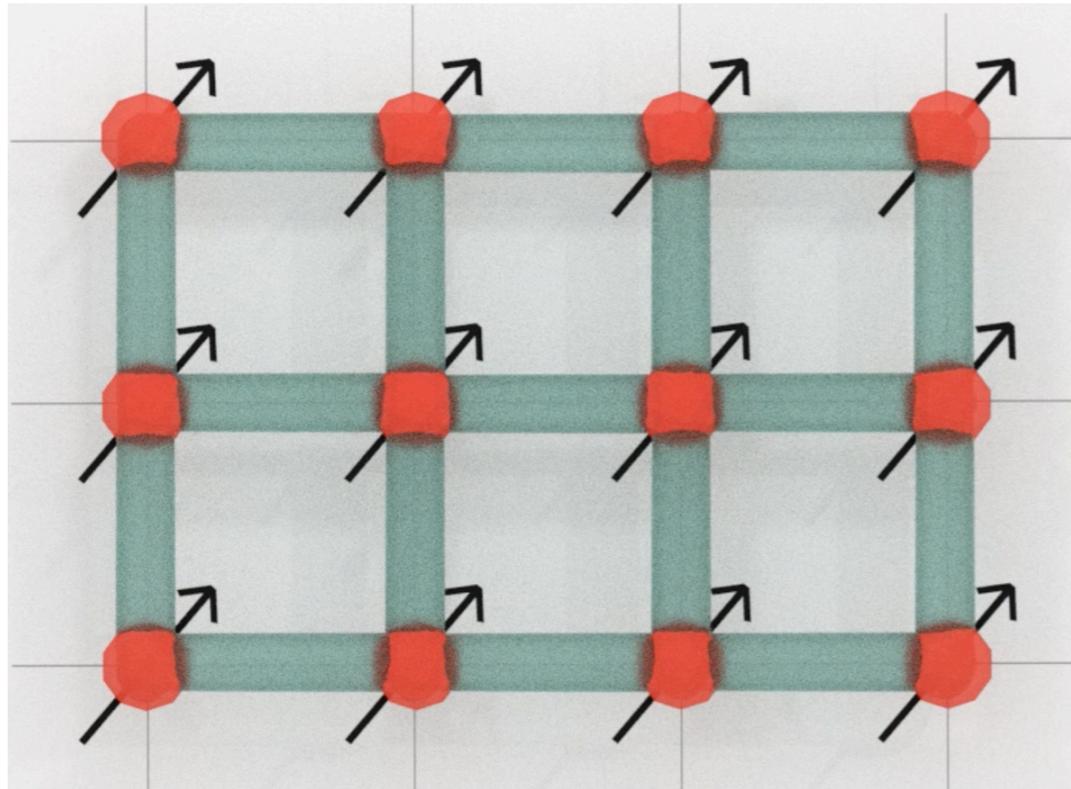
Спин-переориентационные переходы в антиферромагнетиках

**НУГ «Низкотемпературная магнитно-
резонансная спектроскопия»**

Иван Крастилевский, 29.02.2024

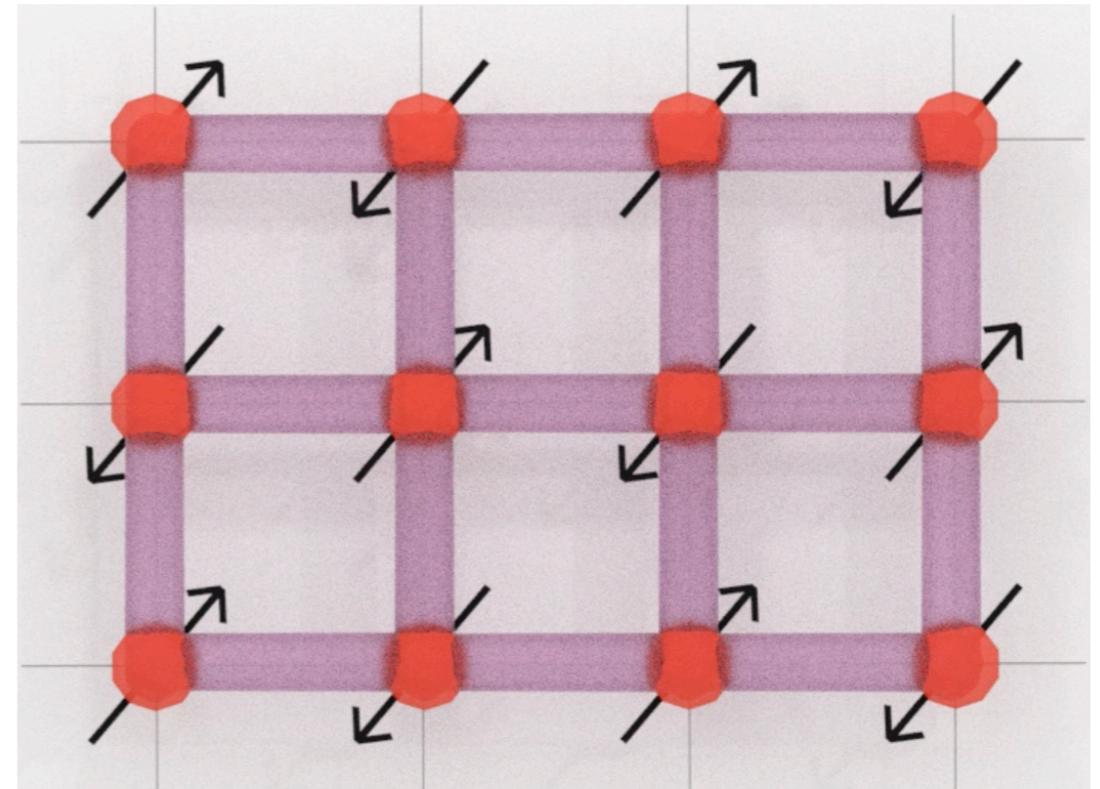
Типы магнитного порядка

Ферромагнетик



$$\vec{M} \neq 0 \quad J < 0$$

Антиферромагнетик

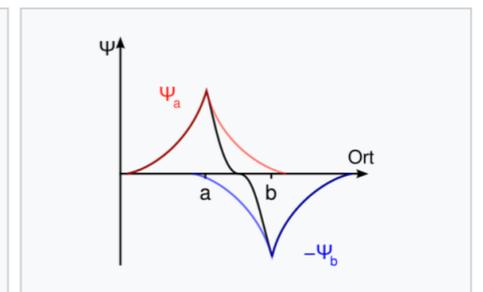
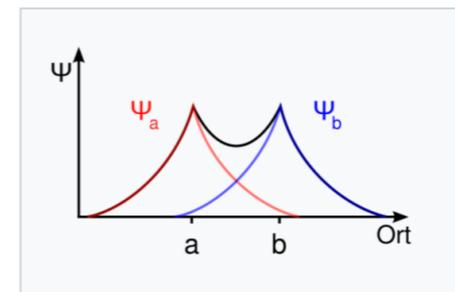


$$\vec{M} = \vec{M}_A - \vec{M}_B = 0 \quad J > 0$$

- Обменное взаимодействие:

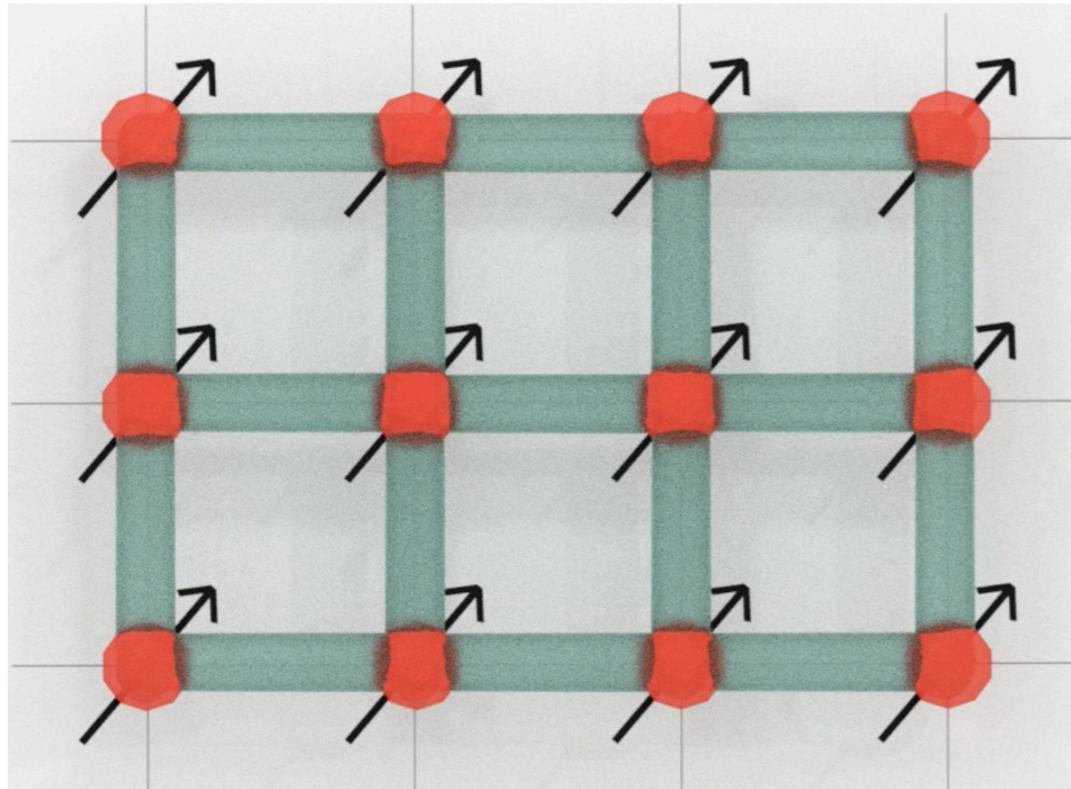
$$\hat{H} = J \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

$$E = \frac{J}{2} \sum_{i,j} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \xrightarrow{\text{для АФМ}} E \propto \vec{M}_A \cdot \vec{M}_B$$



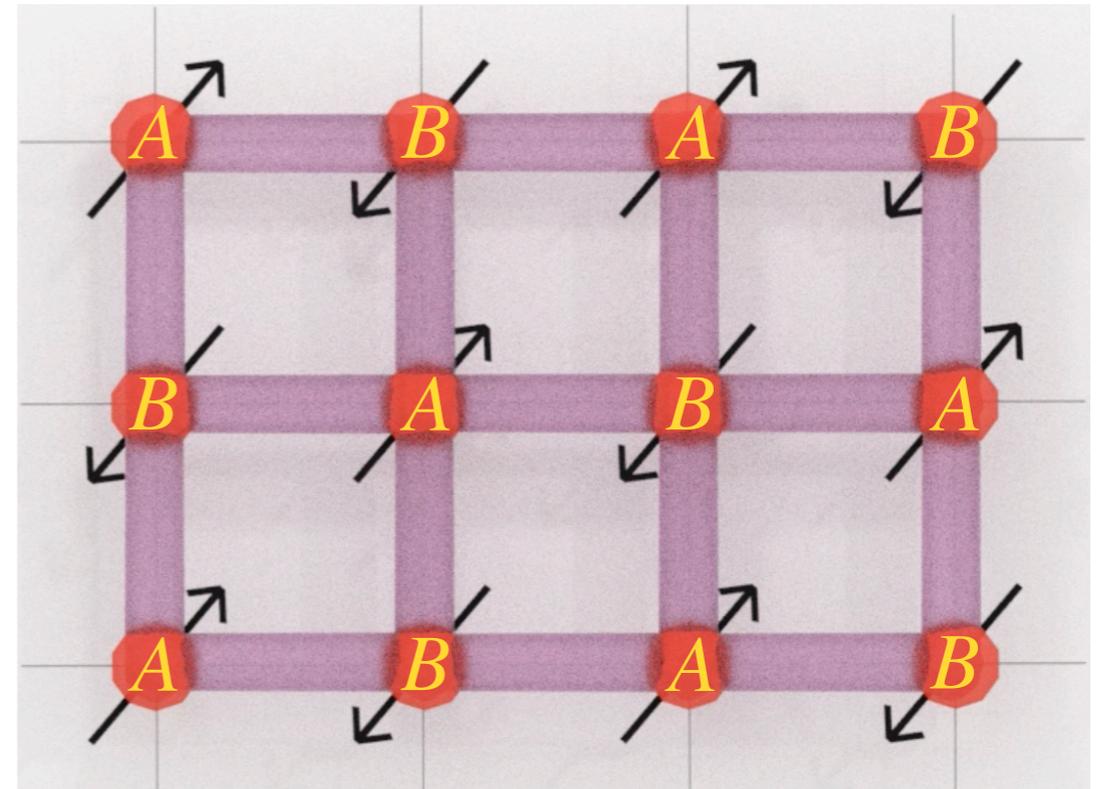
Типы магнитного порядка

Ферромагнетик



$$\vec{M} \neq 0 \quad J < 0$$

Антиферромагнетик

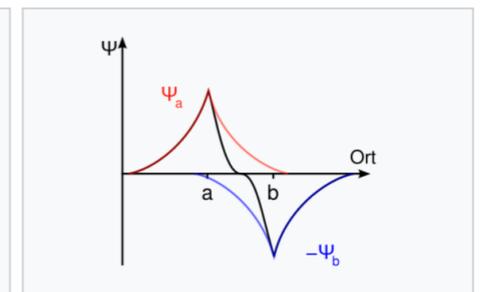
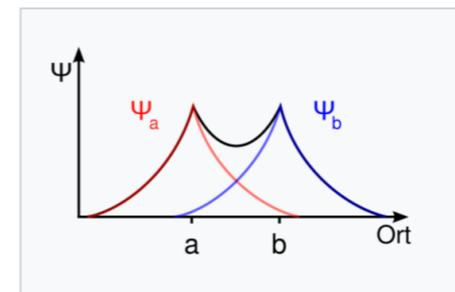


$$\vec{M} = \vec{M}_A - \vec{M}_B = 0 \quad J > 0$$

- Обменное взаимодействие:

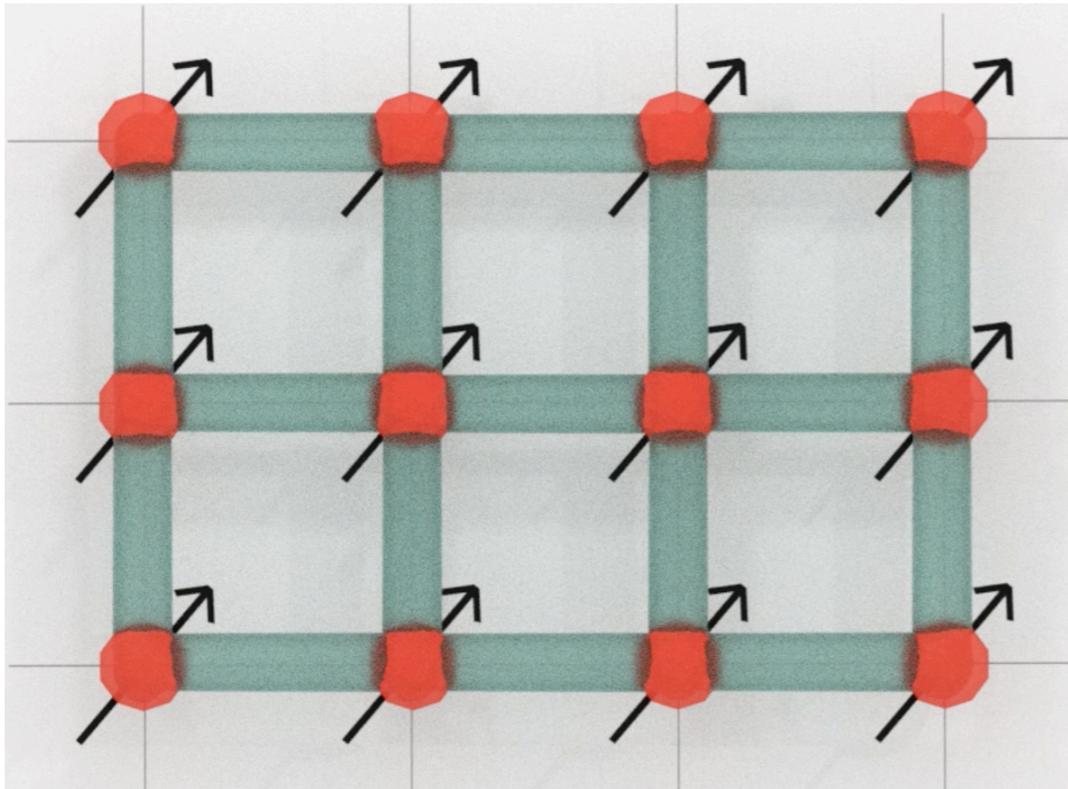
$$\hat{H} = J \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

$$E = \frac{J}{2} \sum_{i,j} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \xrightarrow{\text{для АФМ}} E \propto \vec{M}_A \cdot \vec{M}_B$$



Типы магнитного порядка

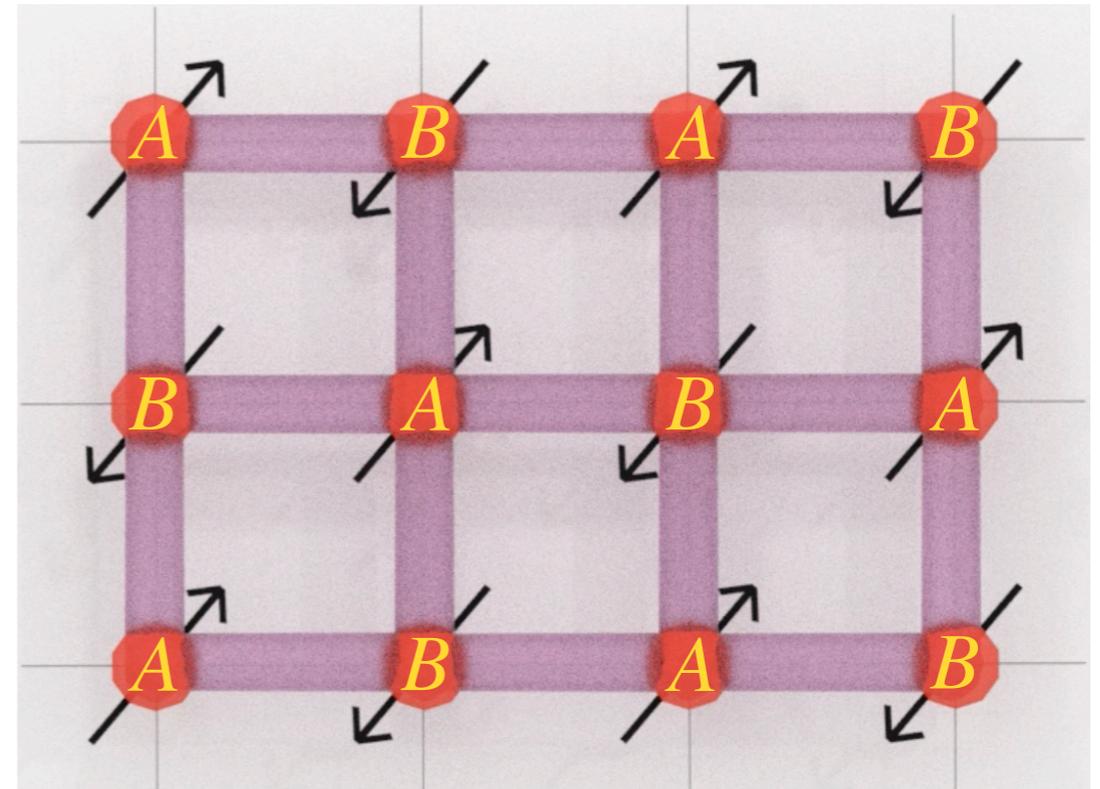
Ферромагнетик



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

$$J < 0$$

Антиферромагнетик



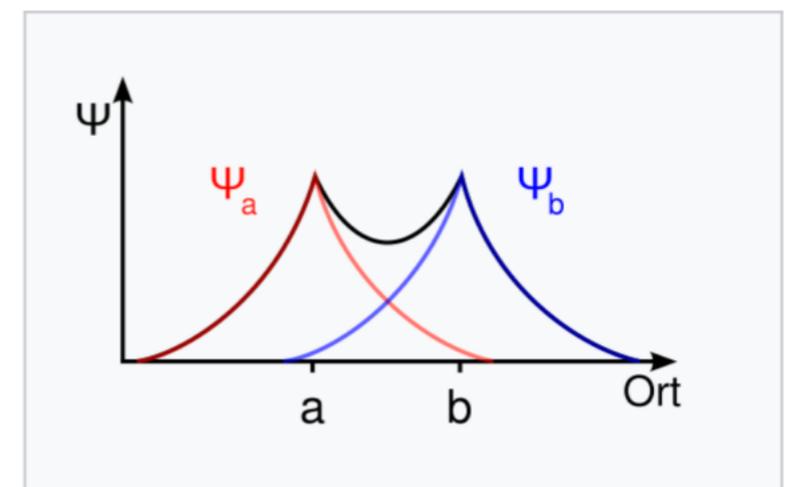
$$\vec{M} = \vec{M}_A - \vec{M}_B = 0$$

$$J > 0$$

- Обменное взаимодействие:

$$\hat{H} = J \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2$$

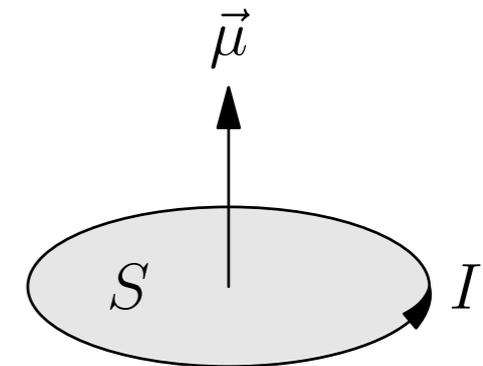
$$E_{ex} = \frac{J}{2} \sum_{i,j} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \xrightarrow{\text{для АФМ}} E_{ex} \propto \vec{M}_A \cdot \vec{M}_B$$



Взаимодействия

- С магнитным полем:

$$E_H = - \sum_i \vec{\mu}_i \cdot \vec{H} \propto - \vec{M} \cdot \vec{H}$$



- Анизотропия (взаимодействие с немагнитными "соседями"):

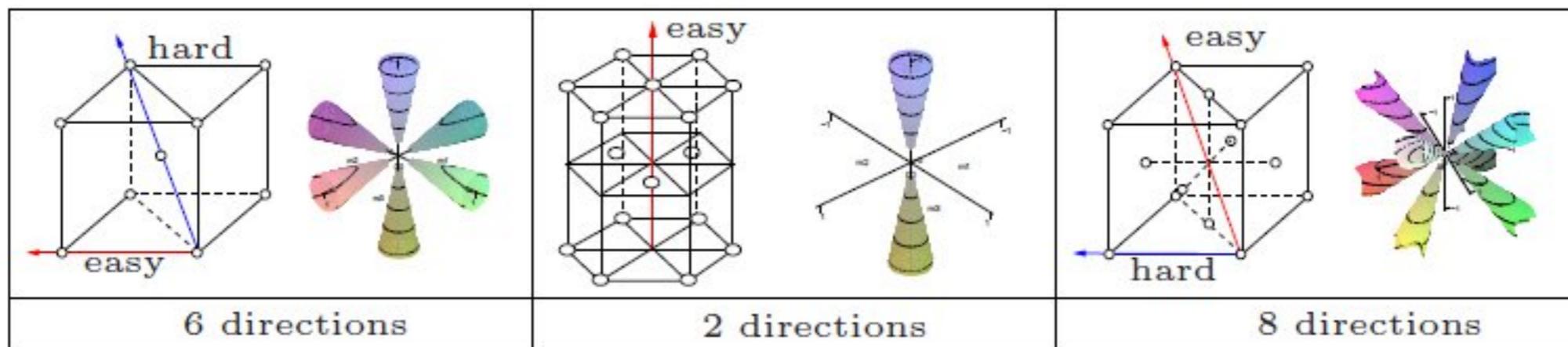
Пример: $\hat{H} = D\hat{S}_z^2 \rightarrow E \propto D(M_{Az}^2 + M_{Bz}^2)$

$D > 0$

"лёгкая плоскость"

$D < 0$

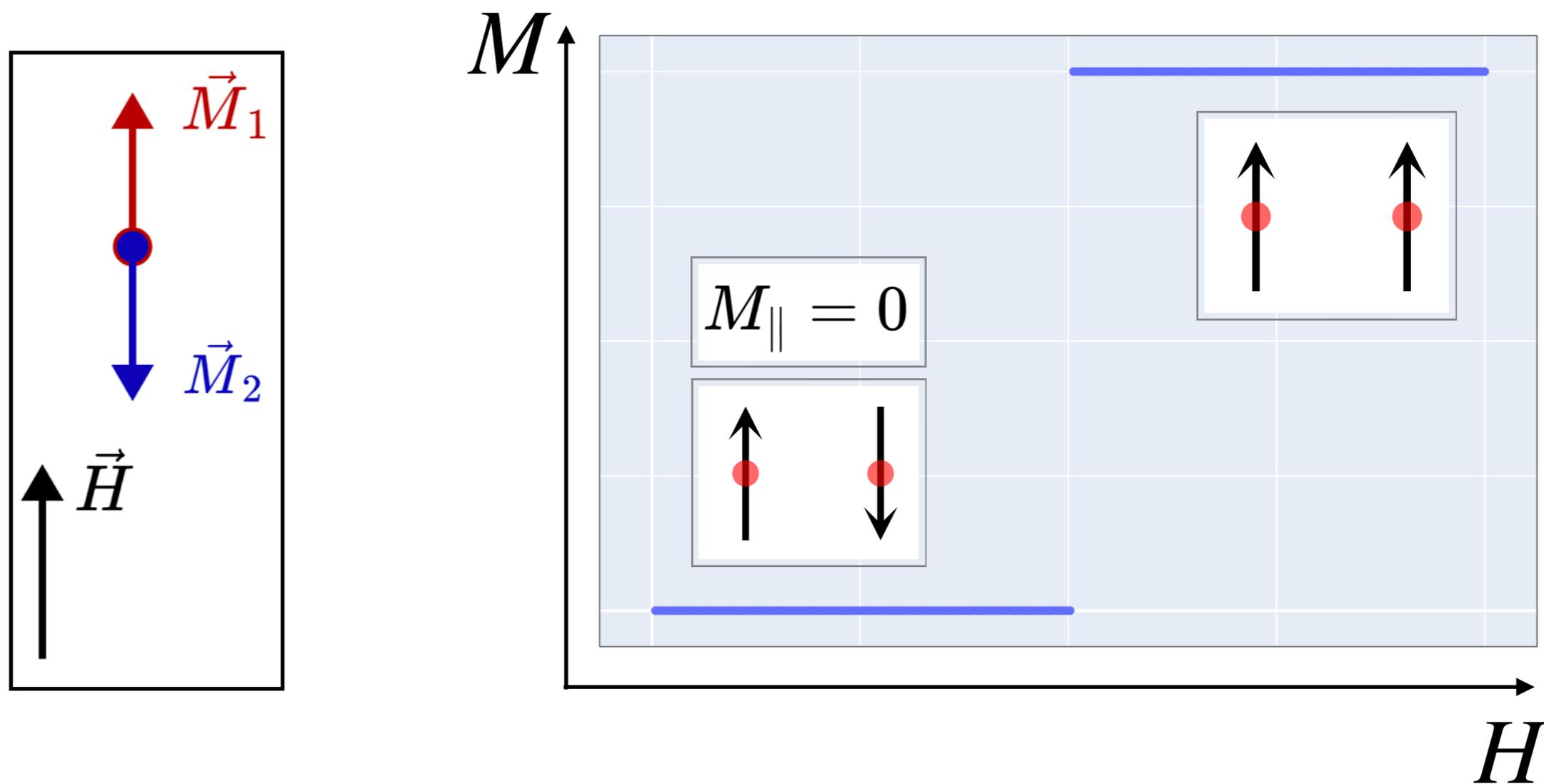
"лёгкая ось"



$$E = E_{ex} + E_H + E_{an}$$

Двухподрешёточный АФМ

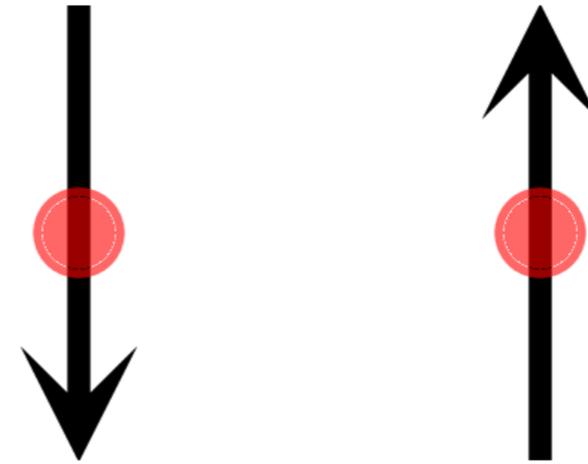
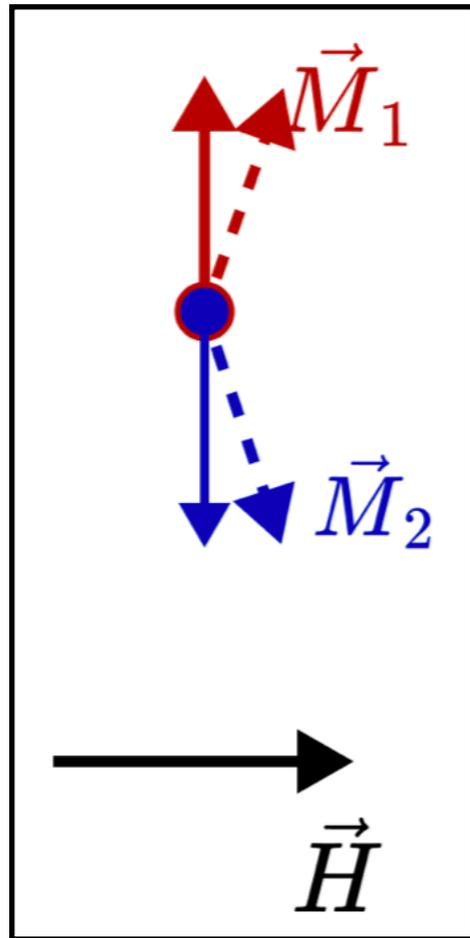
Сильная анизотропия



$$E = a\vec{M}_A \cdot \vec{M}_B - b(\vec{M}_A + \vec{M}_B) \cdot \vec{H}$$

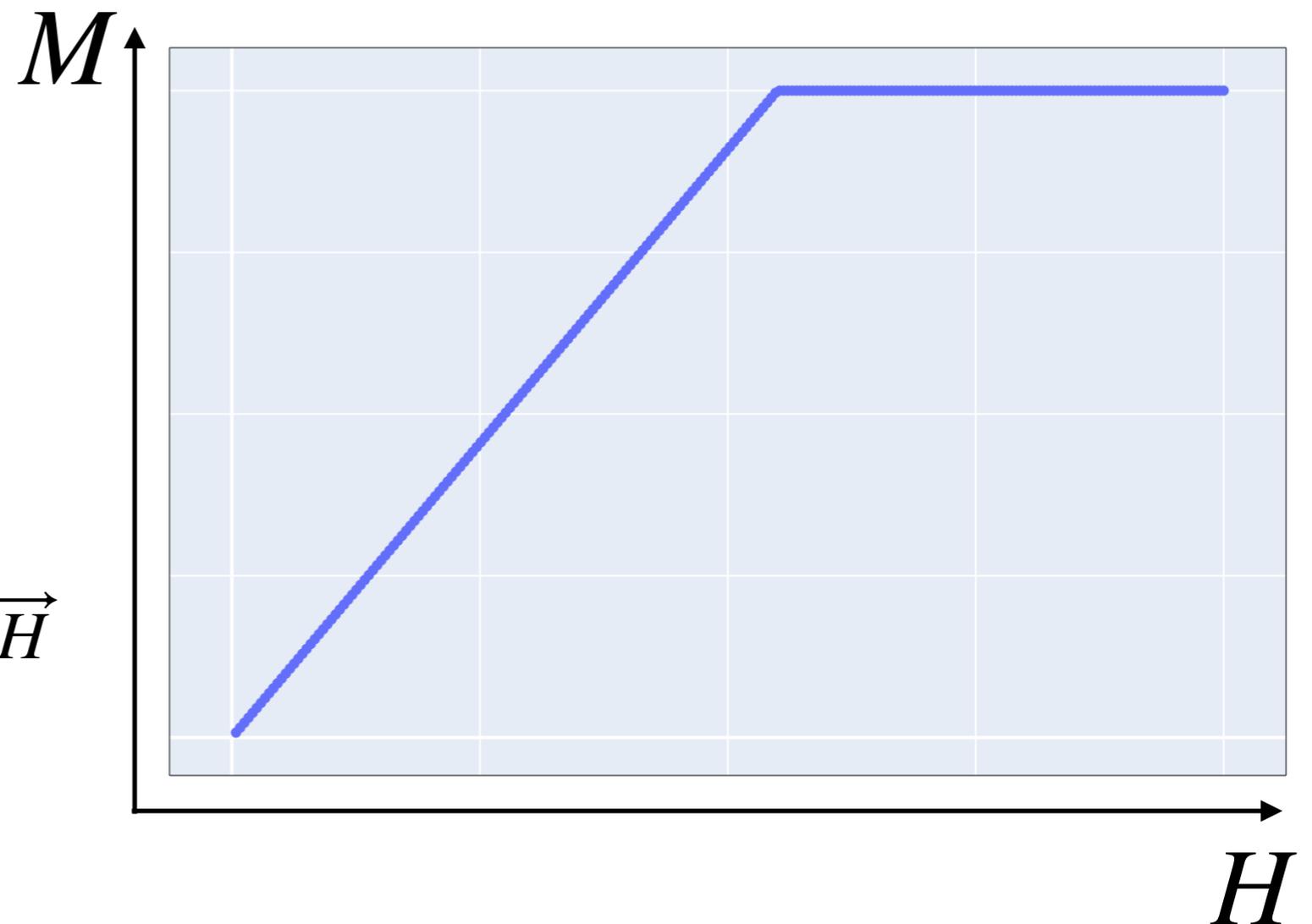
Двухподрешёточный АФМ

Сильная анизотропия



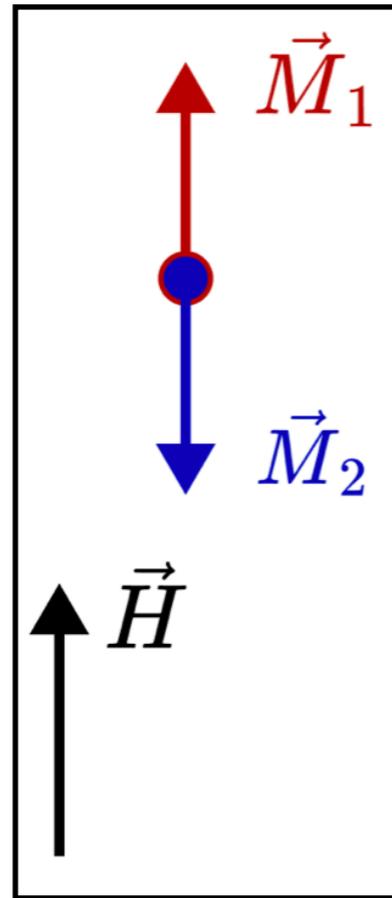
$$E = a\vec{M}_A \cdot \vec{M}_B - b(\vec{M}_A + \vec{M}_B) \cdot \vec{H}$$

$$\sin(\theta) = \frac{M_{sat}}{4sJS^2} H$$



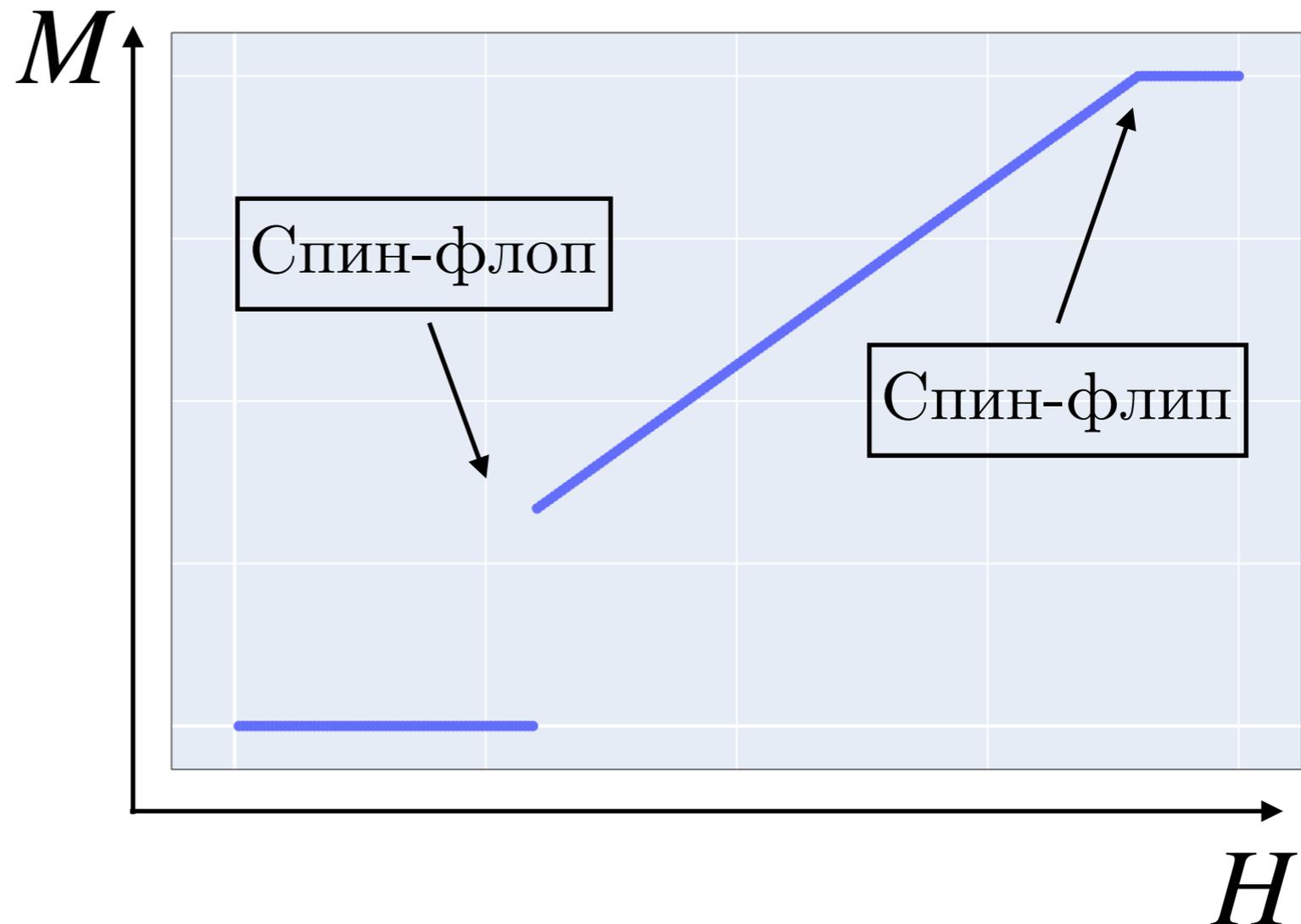
Двухподрешёточный АФМ

Общий случай



```
def energy(field, spin1, spin2):  
    sum = spin1 + spin2  
    return J * np.dot(spin1, spin2) - g * mu * np.dot(sum, field) - D * (spin1[1]**2 + spin2[1]**2)
```

$$E = a\vec{M}_A \cdot \vec{M}_B - b(\vec{M}_A + \vec{M}_B) \cdot \vec{H} + c(M_{Az}^2 + M_{Bz}^2)$$



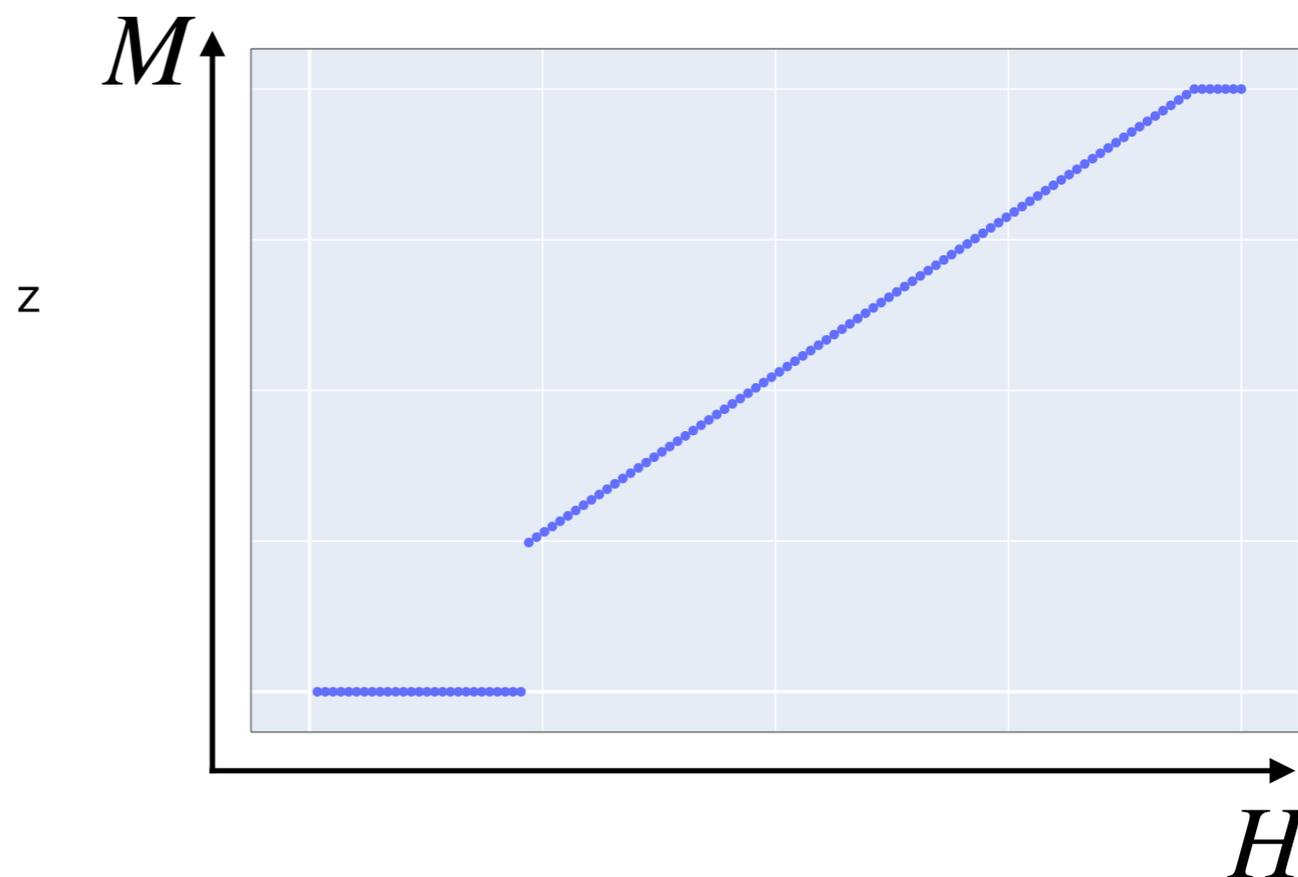
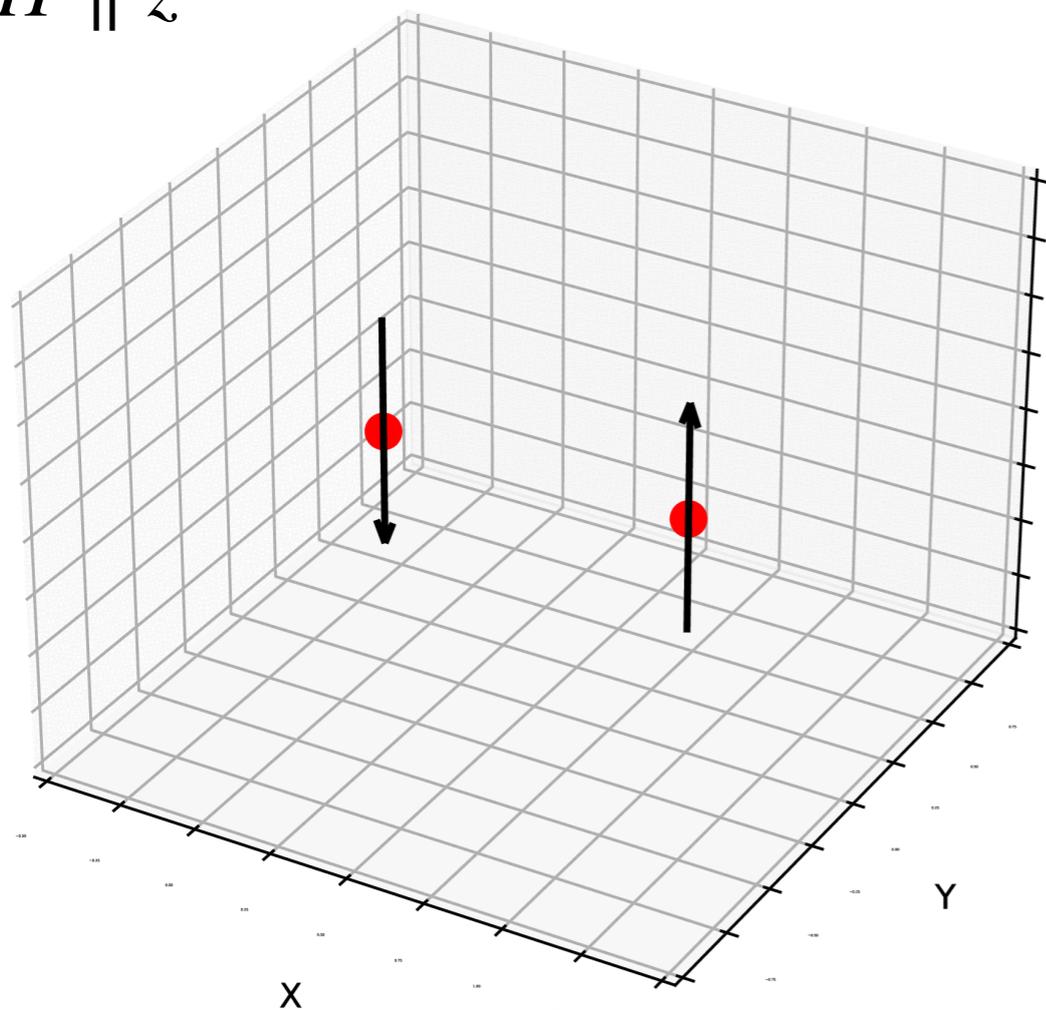
Двухподрешёточный АФМ

Средняя ось

- Анизотропия:

$$D_x \hat{S}_x^2 + D_y \hat{S}_y^2; \quad D_y > D_x > 0 \rightarrow y - \text{трудная ось, } x - \text{средняя, } z - \text{лёгкая}$$

$$\vec{H} \parallel z$$



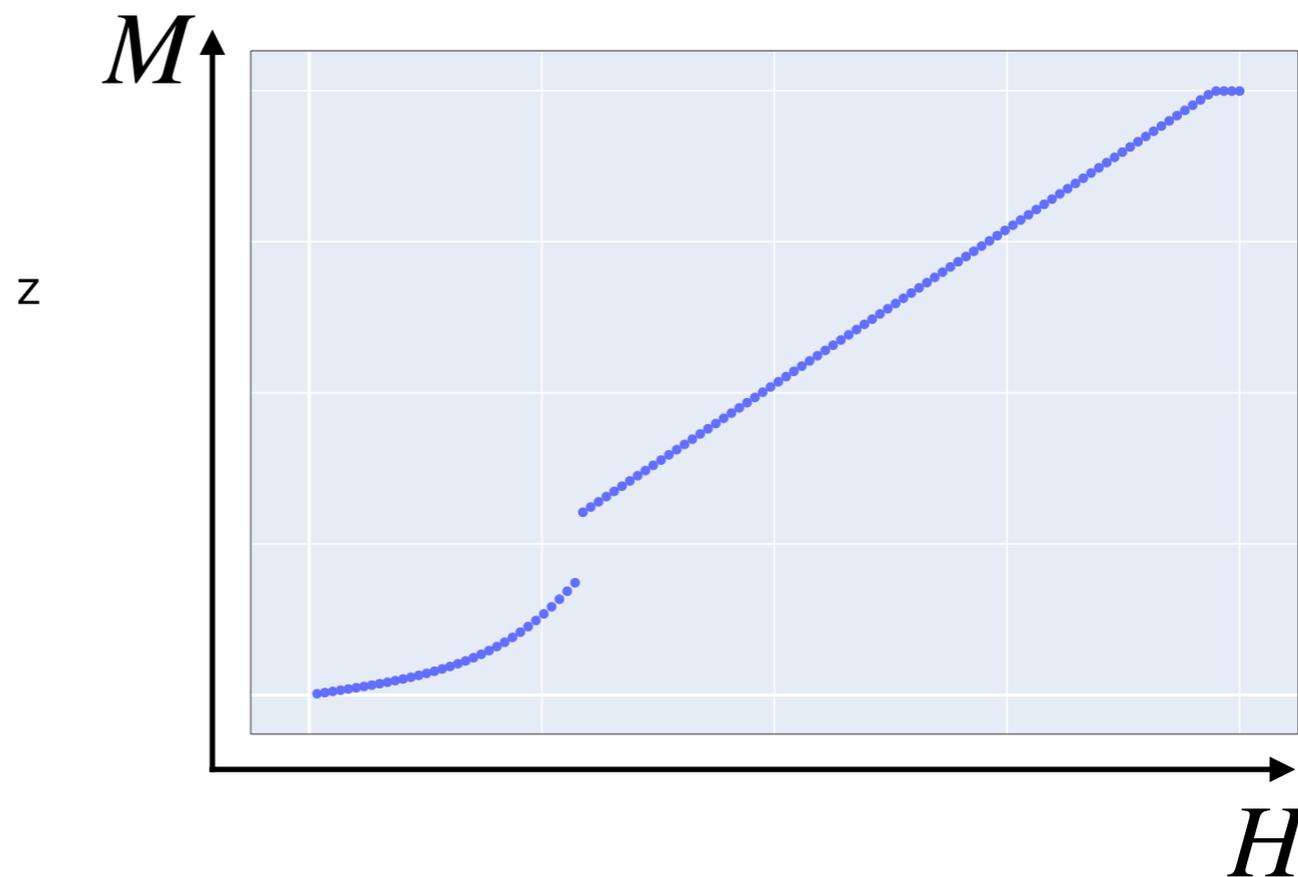
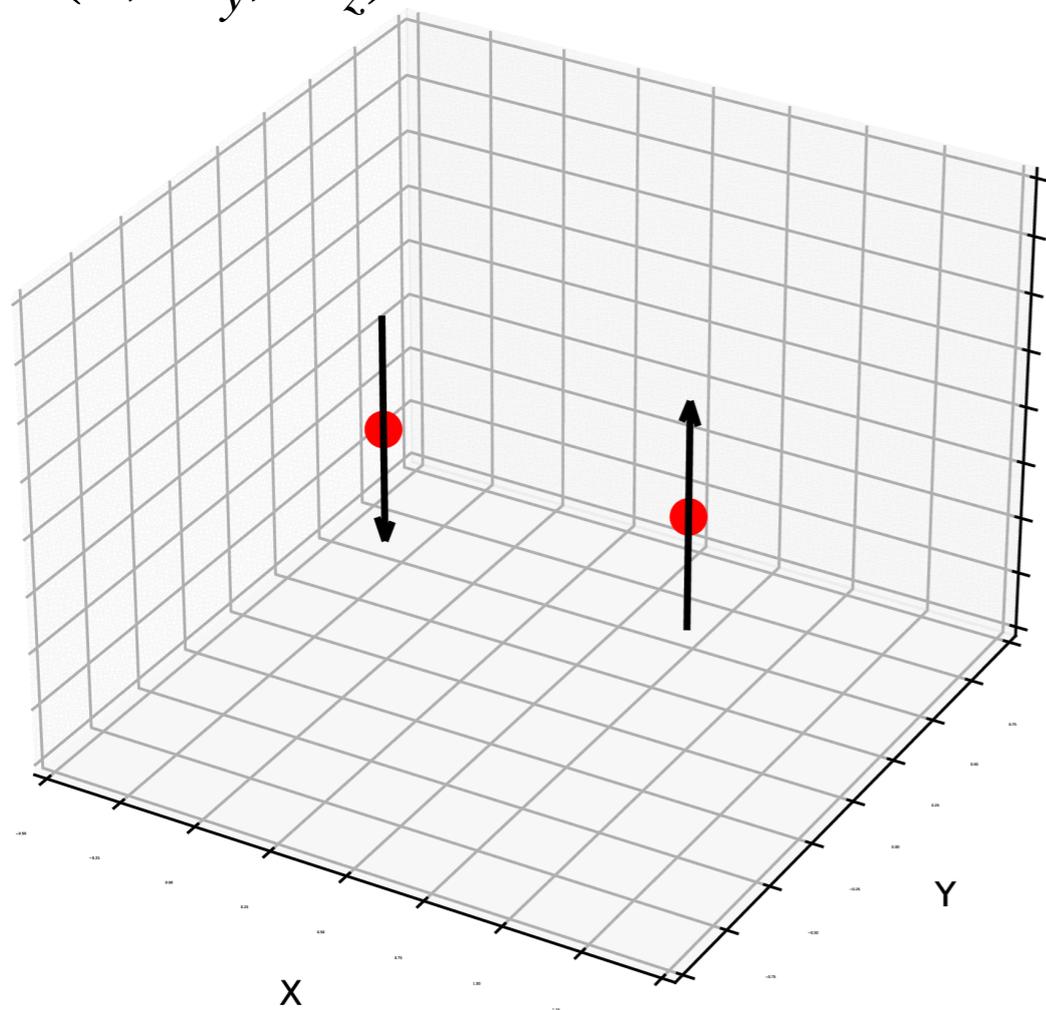
Двухподрешёточный АФМ

Средняя ось

- Анизотропия:

$$D_x \hat{S}_x^2 + D_y \hat{S}_y^2; \quad D_y > D_x > 0 \rightarrow y - \text{трудная ось, } x - \text{средняя, } z - \text{лёгкая}$$

$$\vec{H} = (0, H_y, H_z)$$



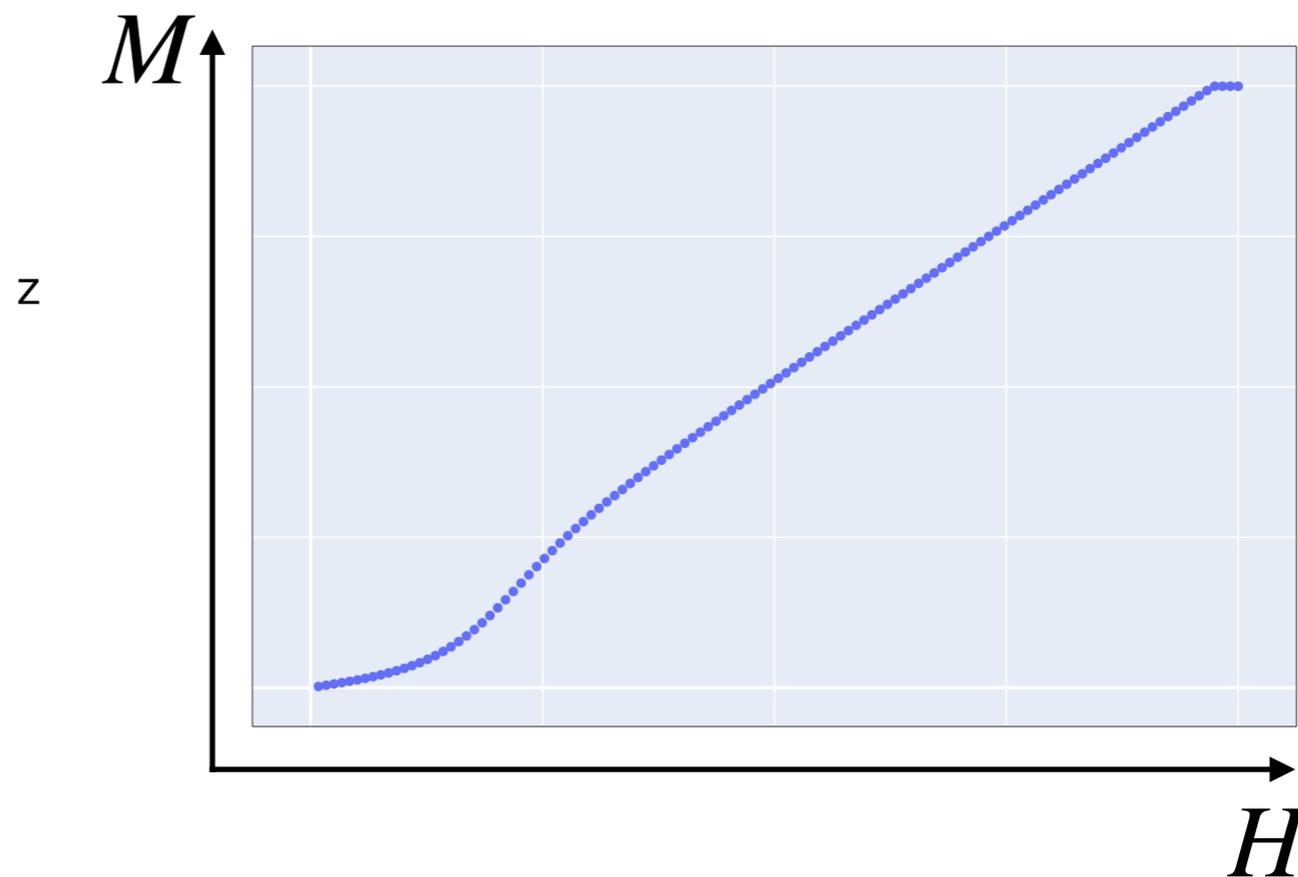
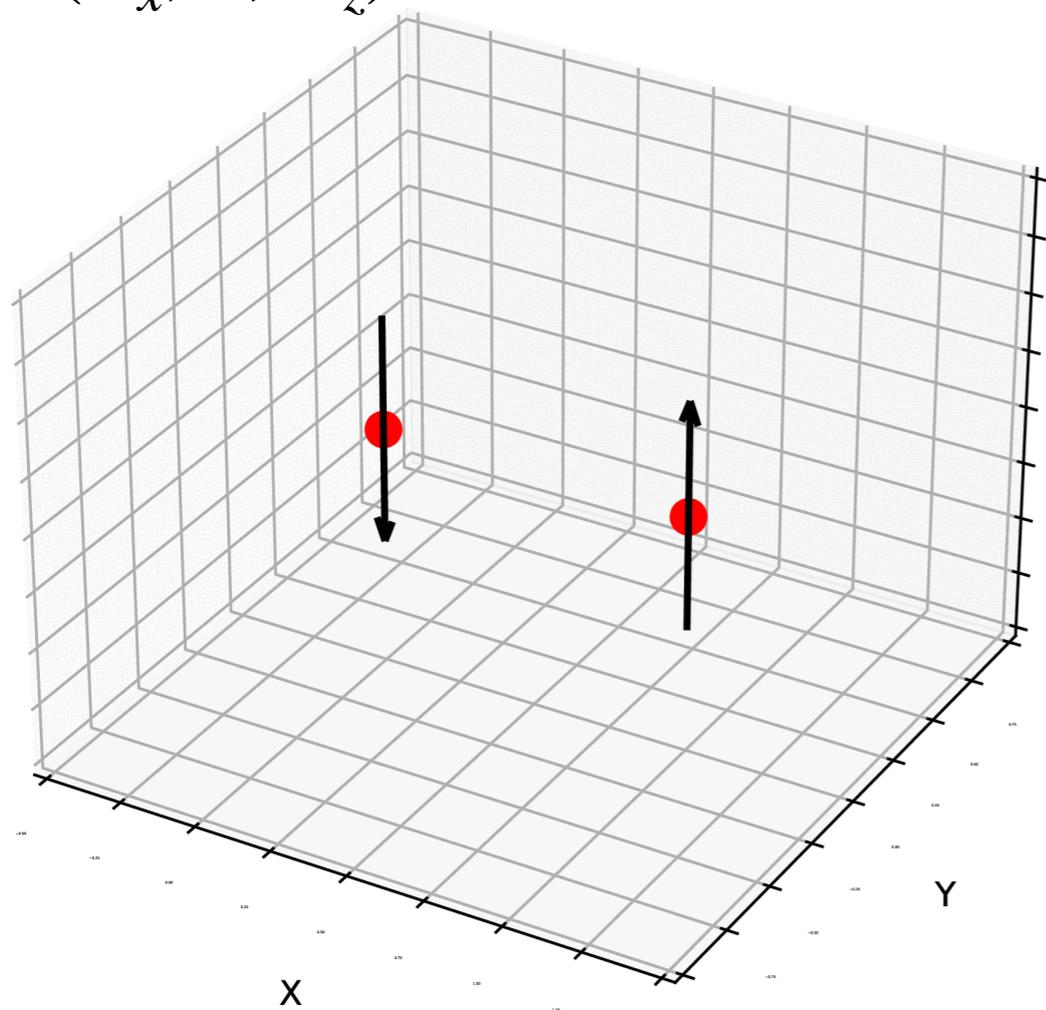
Двухподрешёточный АФМ

Средняя ось

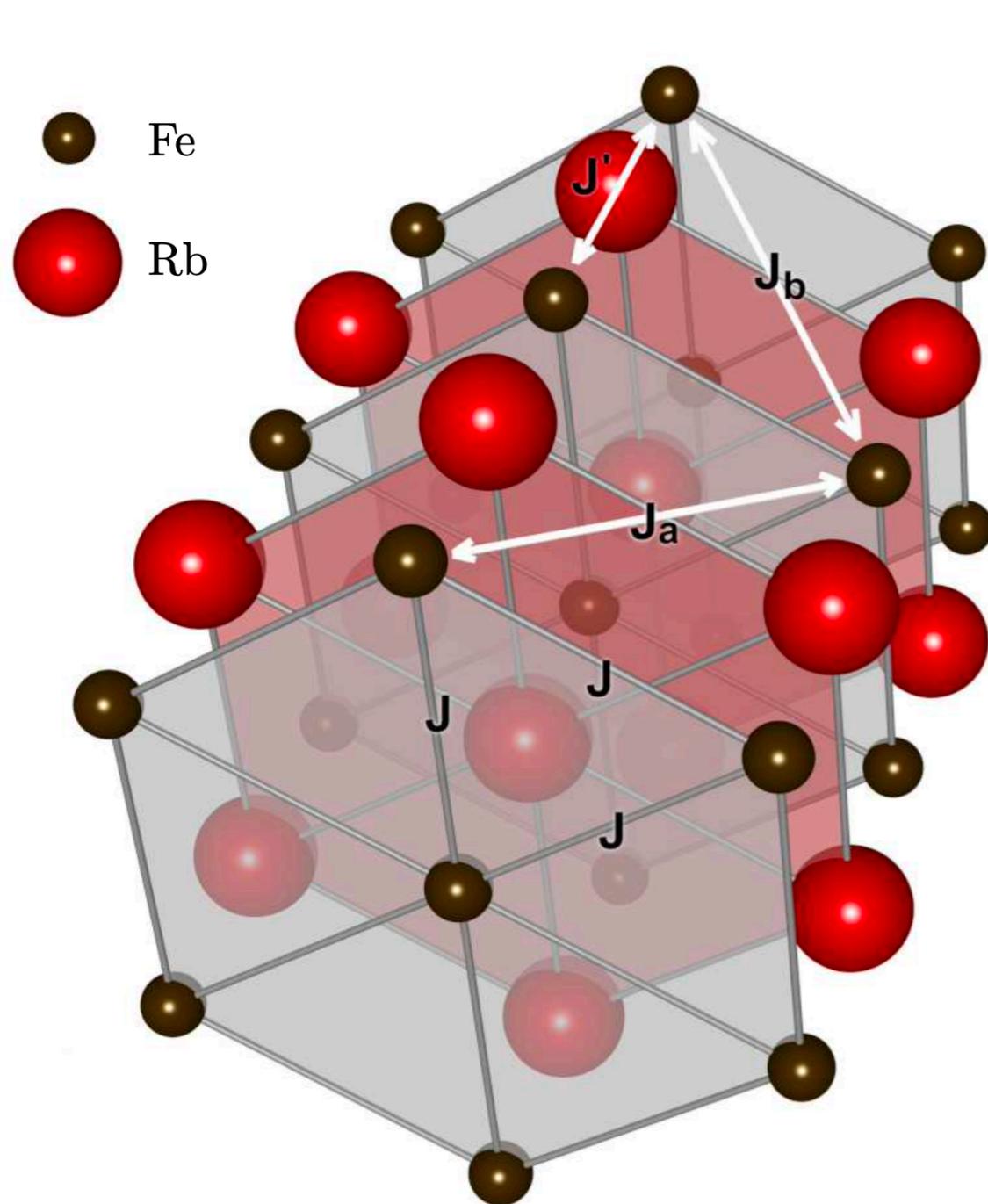
- Анизотропия:

$D_x \hat{S}_x^2 + D_y \hat{S}_y^2$; $D_y > D_x > 0 \rightarrow y$ - трудная ось, x - средняя, z - лёгкая

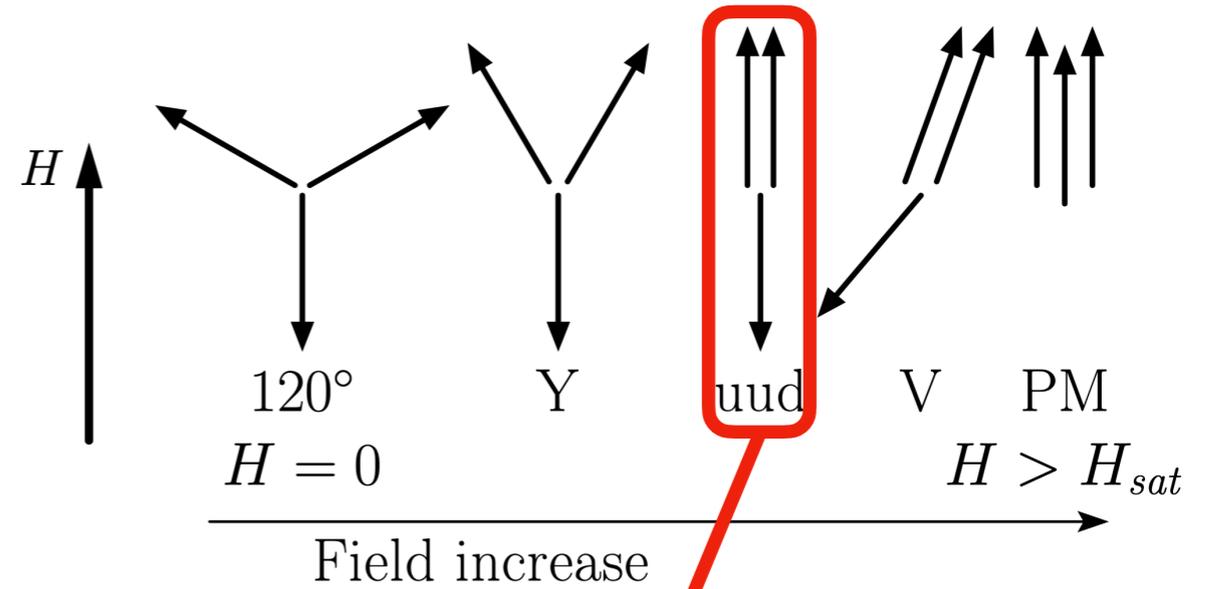
$$\vec{H} = (H_x, 0, H_z)$$



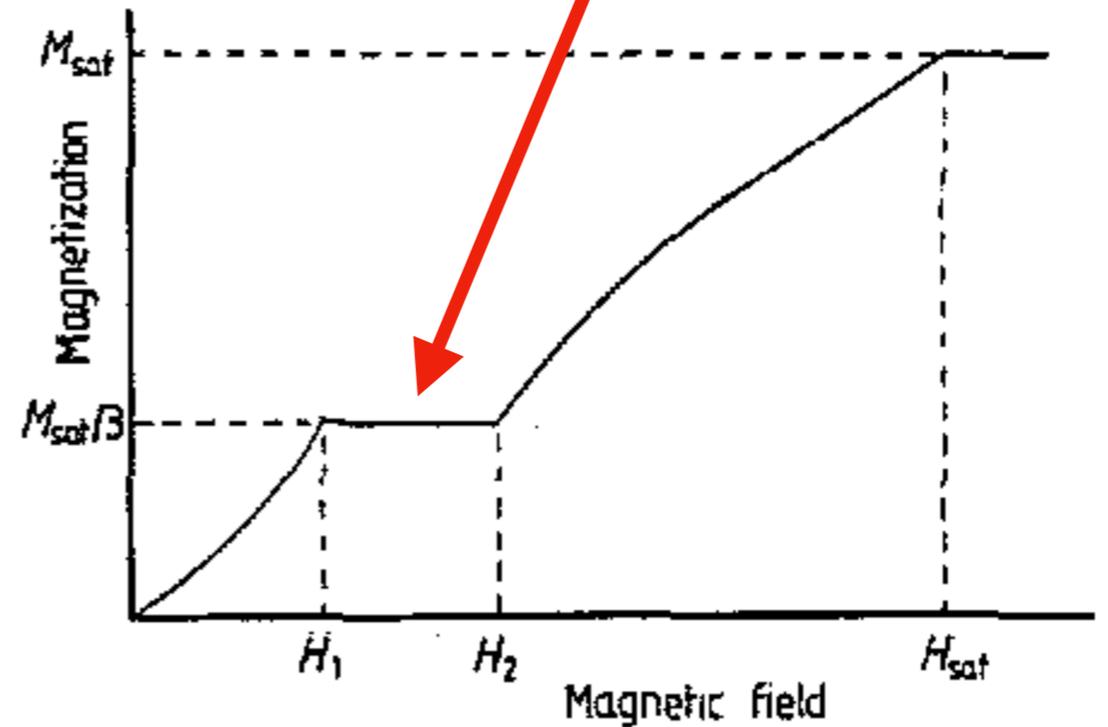
АФМ на треугольной решётке



Структура $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$
СВИСТОВ (2023)

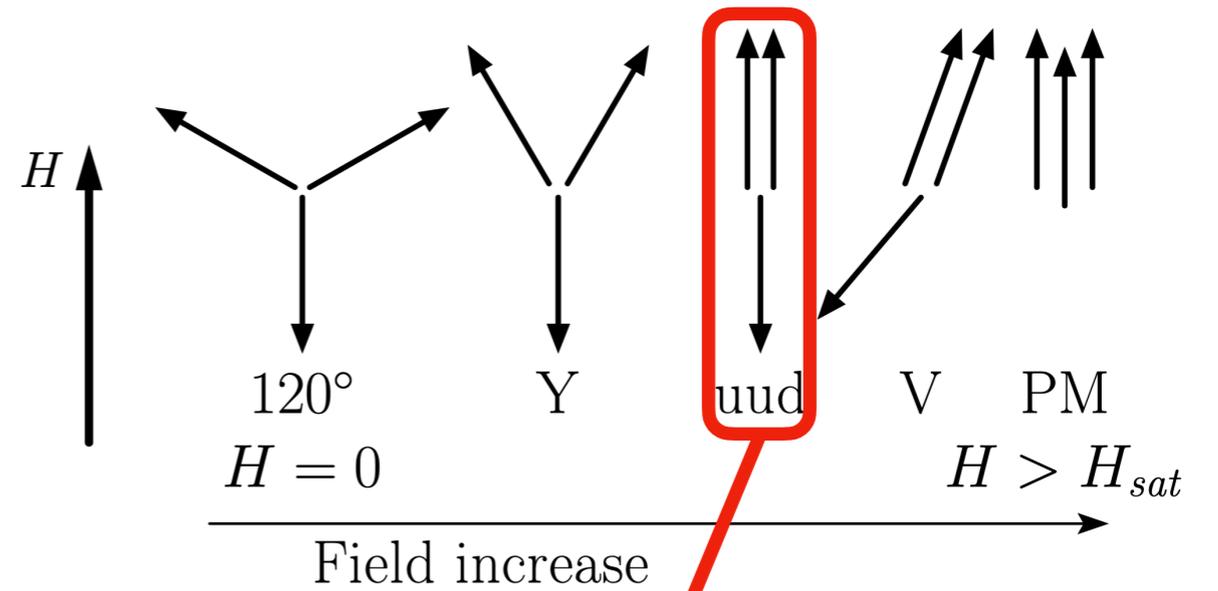
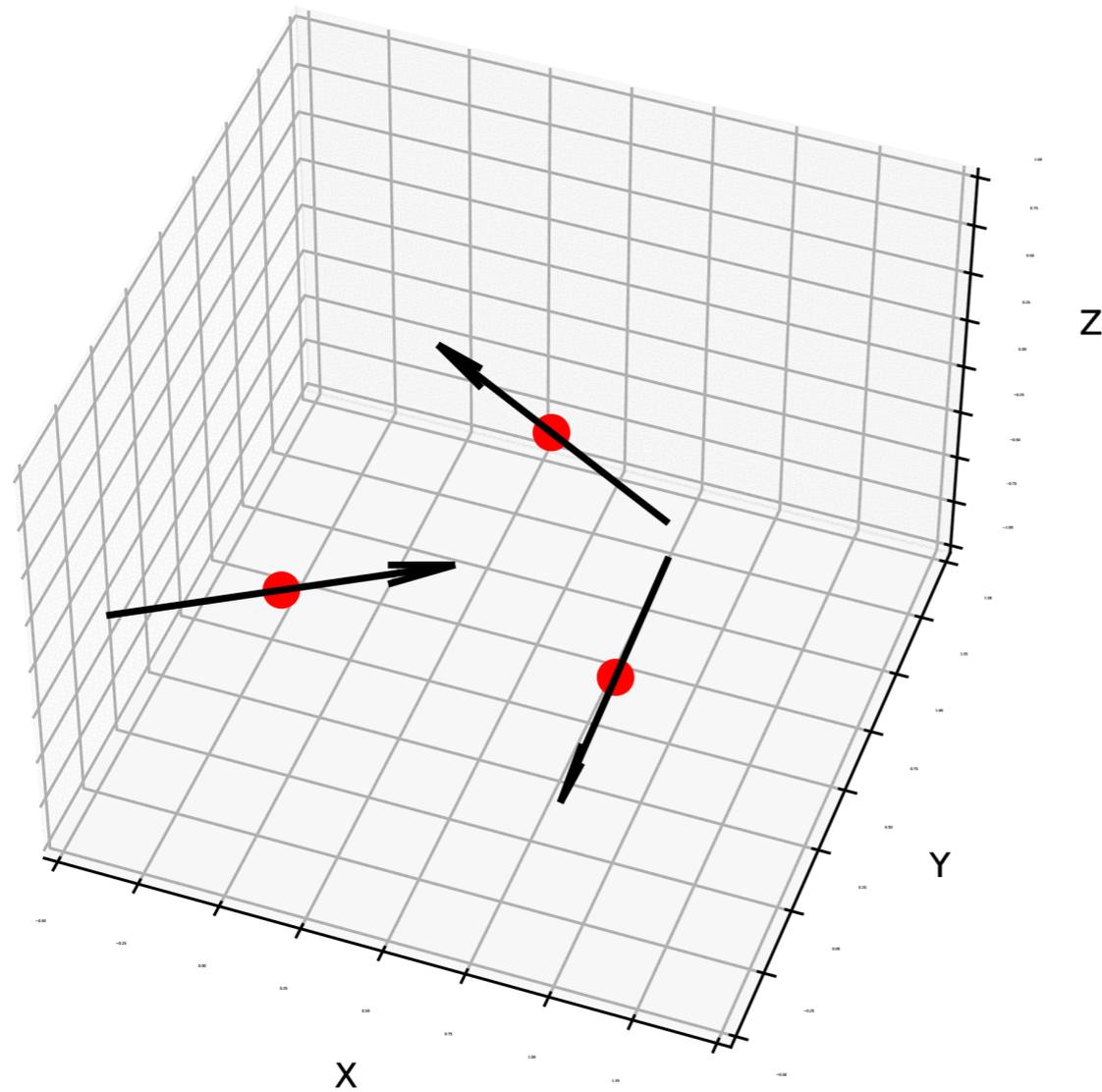


СВИСТОВ (2023)

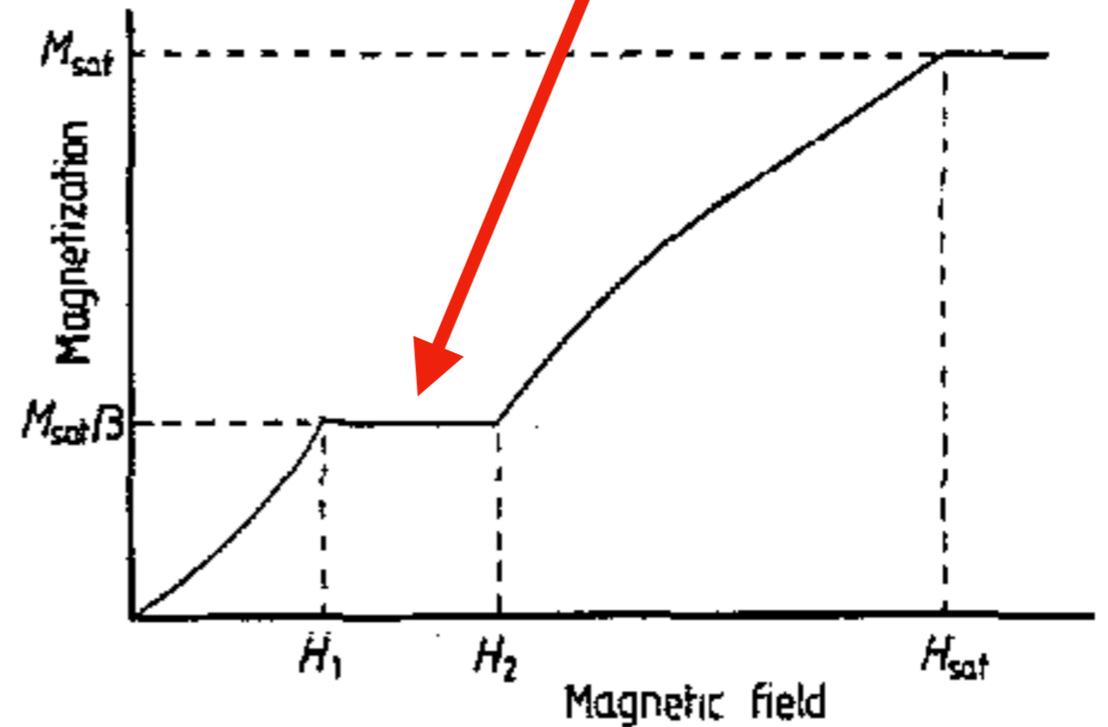


Чубуков и Голосов (1991)

АФМ на треугольной решётке

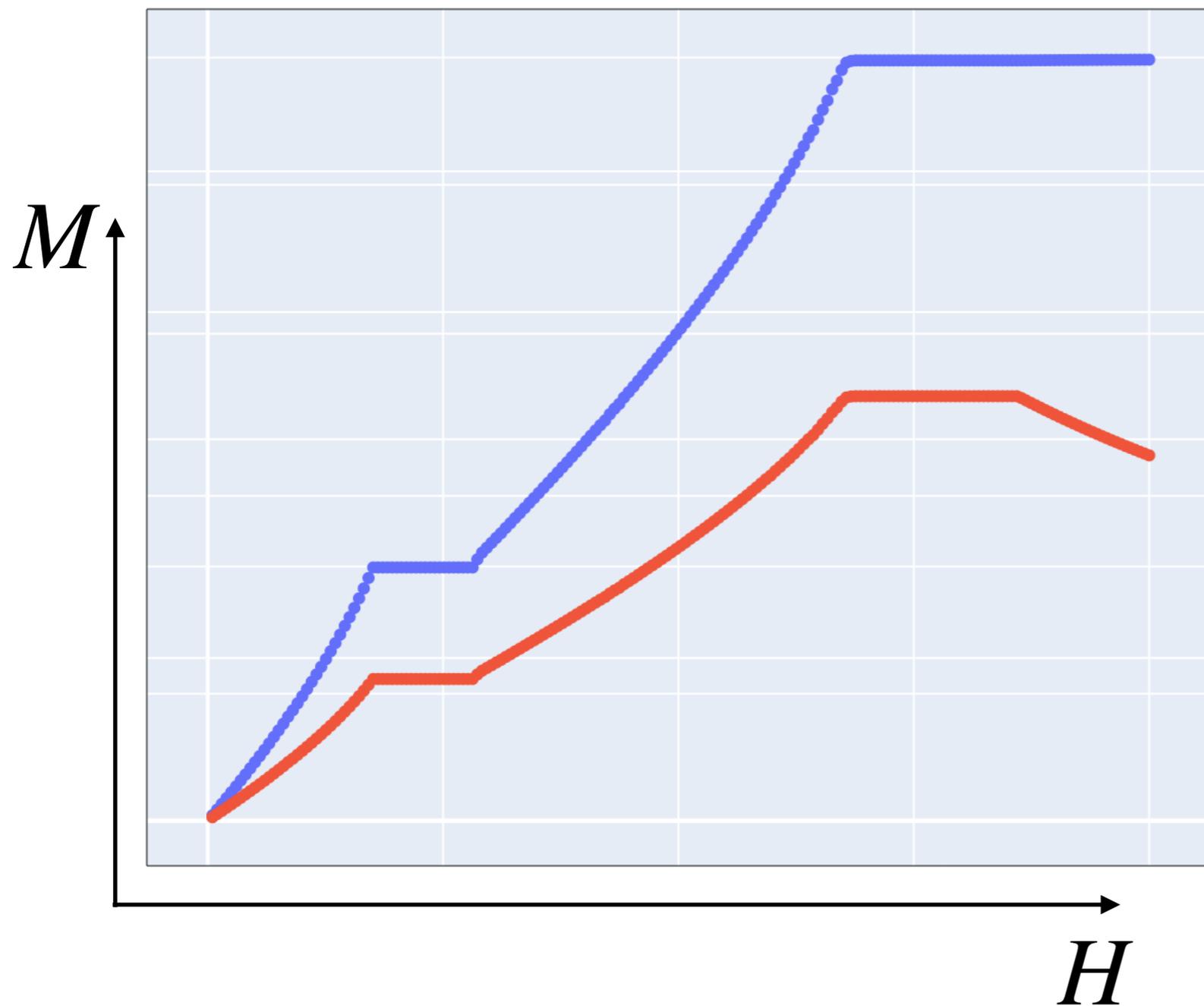


СВИСТОВ (2023)



Чубуков и Голосов (1991)

АФМ на треугольной решётке



- Longitudinal M
- Transverse M

