Магнитооптика

- ✔История магнитооптики
  - ✔Даты – события – люди
- ✔Магнитооптика на кафедре магнетизма
  - ✔Даты – события – люди

Тензор магнитной восприимчивости

1. Уравнение Ландау-Лифшица без релаксационного члена.

a. Компоненты тензора магнитной восприимчивости.

2. Уравнение Ландау-Лифшица с релаксационным членом.

a. Компоненты тензора магнитной восприимчивости.

3. Тензор магнитной проницаемости.

Закон изменения момента импульса

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{T}$$

J – момент импульса
T – момент силы

Момент импульса единицы объема магнитной среды – спин электронов в единице объема с учетом поправок на орбитальное движение

$$\vec{M} = -\gamma \vec{J}$$

M – намагниченность
γ – гиромагнитное отношение (γ>0)

$$-\frac{1}{\gamma}\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{T}$$

Вращающий момент обусловлен эффективным полем $H_{эфф}$

$$\vec{T} = \left[\vec{M} \cdot \vec{H}_{эфф}\right]$$

Уравнение Ландау-Лифшица без релаксационного члена

$$\boxed{\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma\left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{\mathrm{M}}\right]}$$

$$\vec{H}_{эфф} = -\frac{\delta F}{\delta M} \qquad F = F_{обм} + F_{ан} + F_{\text{м.у.}} + F_{м.ст} + F_{H}$$

Домножим обе части уравнения на M

$$\vec{\mathrm{M}}\frac{d\vec{\mathrm{M}}}{dt} = \gamma\left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{\mathrm{M}}\right] \cdot \vec{\mathrm{M}}$$

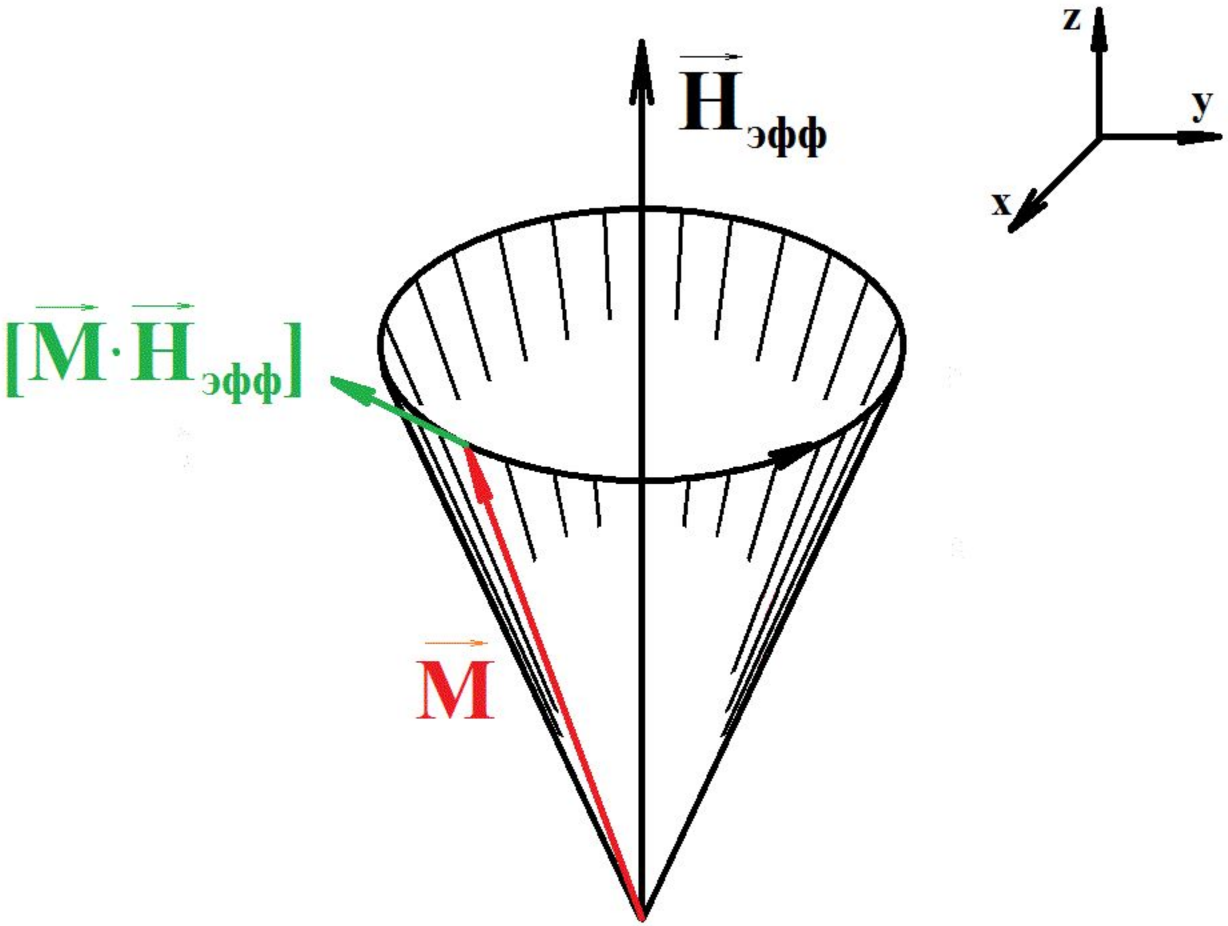
Длина вектора M сохраняется со временем

$$\frac{d\left(\vec{M}\right)^2}{dt} = 0$$

Проекция вектора M на направление $H_{эфф}$ сохраняется со временем

Намагниченность прецессирует вокруг направления $H_{эфф}$

Схема, иллюстрирующая прецессию намагниченности.



Из уравнения Ландау-Лифшица получим компоненты тензора магнитной восприимчивости χ

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{\mathrm{M}} \right]$$

М – намагниченность

$H_{эфф}$ – эффективное поле

γ – гиромагнитное отношение

$H_{эфф} = (h_x, h_y, H_o)$; $h_x, h_y << H_o$.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ h_x & h_y & H_o \\ m_x & m_y & M_z \end{vmatrix}$$

$M=(m_x, m_y, M_z)$;

$m_x \sim m_y$,

$m_x, m_y << M_z$,

$M_z \sim M_o$

$$\begin{cases} \dfrac{dm_x}{dt} = \gamma\left(M_z h_y - m_y H_o\right) \\ \dfrac{dm_y}{dt} = \gamma\left(m_x H_o - M_z h_x\right) \\ \dfrac{dM_z}{dt} = \gamma\left(m_y \cdot h_x - m_x \cdot h_y\right) \end{cases}$$

Заменим M_z на M_o

$$\begin{cases} \dot{m}_x = \gamma M_o h_y - \gamma m_y H_o \\ \dot{m}_y = \gamma m_x H_o - \gamma M_o h_x \\ \dot{M}_z = \gamma\left(m_y h_x - m_x h_y\right) = 0 \end{cases}$$

Ищем решение в виде $m_x = m_{xo}e^{i\omega t}$, $m_y = m_{yo}e^{i\omega t}$, учтем, что $\dot{m}_x = i\omega m_x$ и $\dot{m}_y = i\omega m_y$.

$$
\begin{cases}
i\omega m_x = \gamma M_o h_y - \gamma m_y H_o \\
i\omega m_y = \gamma m_x H_o - \gamma M_o h_x
\end{cases}
$$

Обозначим $\omega_o = \gamma H_o$

$$\begin{cases} i\omega m_x = \gamma M_o h_y - m_y \omega_o \\ i\omega m_y = m_x \omega_o - \gamma M_o h_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x i\omega + m_y \omega_o = \gamma M_o h_y \Big| \cdot \omega_o \\ m_x \omega_o - m_y i\omega = \gamma M_o h_x \Big| \cdot i\omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x \omega_o i\omega + m_y {\omega_o}^2 = \gamma M_o h_y \omega_o \\ m_x \omega_o i\omega - m_y (i\omega)^2 = \gamma M_o h_x i\omega \end{cases}$$

Вычитаем

$$\boxed{m_y\left((i\omega)^2+\omega_o{}^2\right)=h_x\left(-i\omega\gamma M_o\right)+h_y\left(\gamma M_o\omega_o\right)}$$

Домножим уравнения

$$\begin{cases} m_x i\omega + m_y\omega_o = \gamma M_o h_y \Big| \cdot i\omega \\ m_x\omega_o - m_y i\omega = \gamma M_o h_x \Big| \cdot \omega_o \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x(i\omega)^2 + m_y\omega_o i\omega = \gamma M_o h_y i\omega \\ m_x\omega_o{}^2 - m_y\omega_o i\omega = \gamma M_o h_x\omega_o \end{cases}$$

Складываем

$$\boxed{m_x\left((i\omega)^2+\omega_o{}^2\right)=h_x\left(\gamma M_o\omega_o\right)+h_y\left(i\gamma M_o\omega\right)}$$

χ – тензор магнитной восприимчивости

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \end{pmatrix}$$

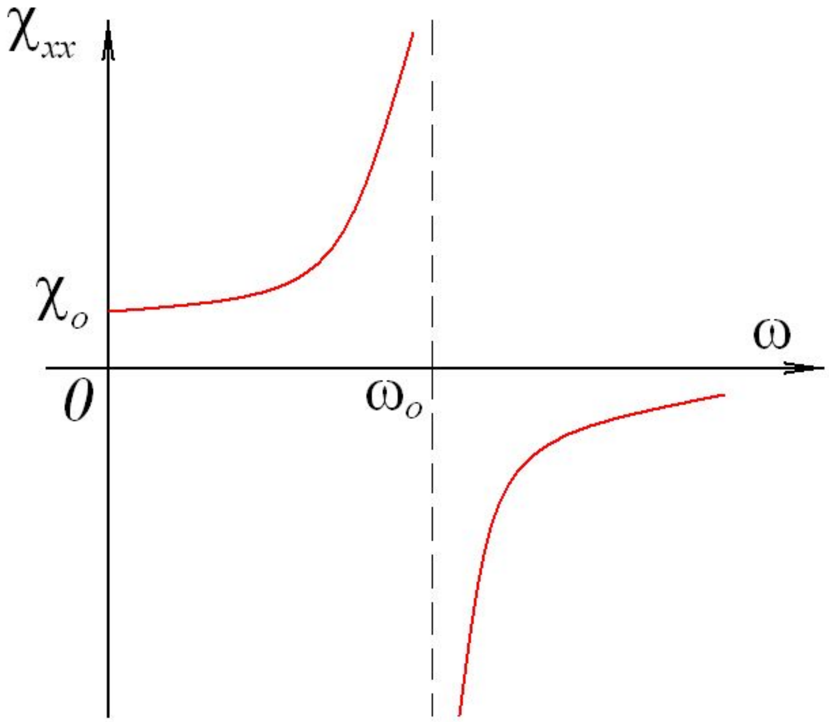
Поскольку $\chi_{xx} = \frac{m_x}{h_x}$, $\chi_{xy} = \frac{m_x}{h_y}$, $\chi_{yx} = \frac{m_y}{h_x}$, $\chi_{yy} = \frac{m_y}{h_y}$,

то с учетом того, что $\gamma = \frac{\omega_o}{H_o}$ и $\chi_o = \frac{M_o}{H_o}$

$$\chi_{xx} = \frac{\gamma M_o \omega_o}{(i\omega)^2 + \omega_o^2} = \frac{\frac{\omega_o}{H_o} M_o \omega_o}{\omega_o^2 - \omega^2} = \frac{\chi_o \omega_o^2}{\omega_o^2 - \omega^2}$$

$$\chi_{yy} = \frac{\gamma M_o \omega_o}{(i\omega)^2 + \omega_o^2} = \frac{\chi_o \omega_o^2}{\omega_o^2 - \omega^2}$$

Диагональные компоненты тензора χ (действительны и равны)



$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \frac{\chi_o \omega_o^{\,2}}{\omega_o^{\,2} - \omega^2}$$

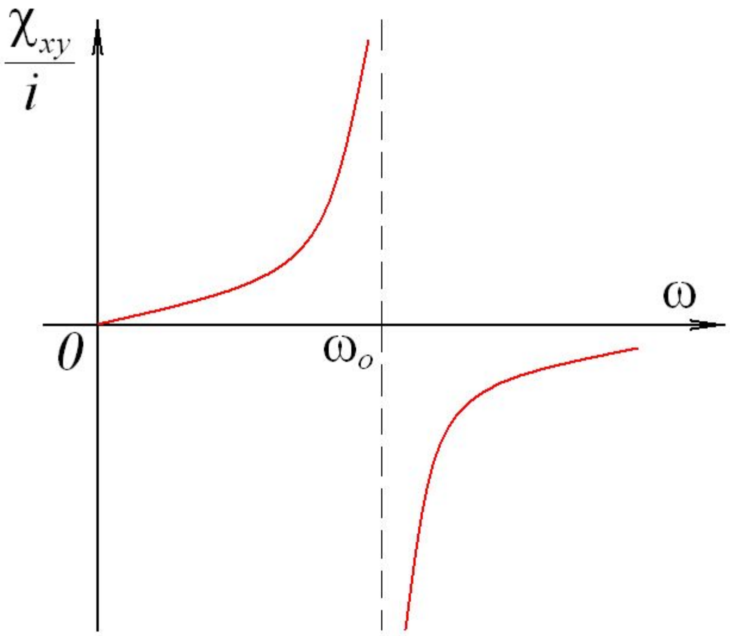
Поскольку $\gamma = \dfrac{\omega_o}{H_o}$

$$\chi_{xy} = \frac{i\gamma M_o\omega}{(i\omega)^2 + \omega_o^{\;2}} = \frac{i\gamma M_o\omega}{\omega_o^{\;2} - \omega^2}$$

$$\chi_{yx} = \frac{-i\gamma M_o\omega}{(i\omega)^2 + \omega_o^{\;2}} = \frac{-i\gamma M_o\omega}{\omega_o^{\;2} - \omega^2}$$

$$\chi_{xy} = -\chi_{yx}$$

Недиагональные компоненты тензора χ (мнимые и асимметричные)



$$\chi_{xy} = -\chi_{yx}$$

$$\chi_{xy} = \frac{i\gamma M_o \omega}{\omega_o^2 - \omega^2}$$

Тензор χ - эрмитовый

Уравнение Ландау-Лифшица

$$\boxed{\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma\left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{M}\right]}$$

Без релаксационного члена

$$\vec{H}_{эфф} = -\frac{\delta F}{\delta M}$$

$$F = F_{обм} + F_{ан} + F_{м.у.} + F_{м.ст} + F_{H}$$

С релаксационным членом в форме Гильберта

$$\boxed{\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma\left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{M}\right] + \frac{\alpha}{M_o}\left[\vec{M} \cdot \frac{d\vec{M}}{dt}\right]}$$

$$\vec{R} = \frac{\alpha}{M_o}\left[\vec{M} \cdot \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}\right]$$

С релаксационным членом в форме Ландау

$$\boxed{\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma\left[\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{M}\right] + \varepsilon\left(\vec{H}_{эфф} - \frac{\left(\vec{H}_{эфф} \cdot \vec{M}\right) \cdot \vec{M}}{M_o^{2}}\right)}$$

Уравнение Ландау-Лифшица с релаксационным членом

$$\frac{d\overrightarrow{M}}{dt} = \gamma\left[\overrightarrow{H}_{эфф} \cdot \overrightarrow{\mathrm{M}}\right] + \varepsilon\left(\overrightarrow{H}_{эфф} - \frac{\left(\overrightarrow{H}_{эфф} \cdot \overrightarrow{\mathrm{M}}\right) \cdot \overrightarrow{\mathrm{M}}}{M_o^{\,2}}\right)$$

M – намагниченность

$$\frac{\varepsilon}{M_o} << 1$$

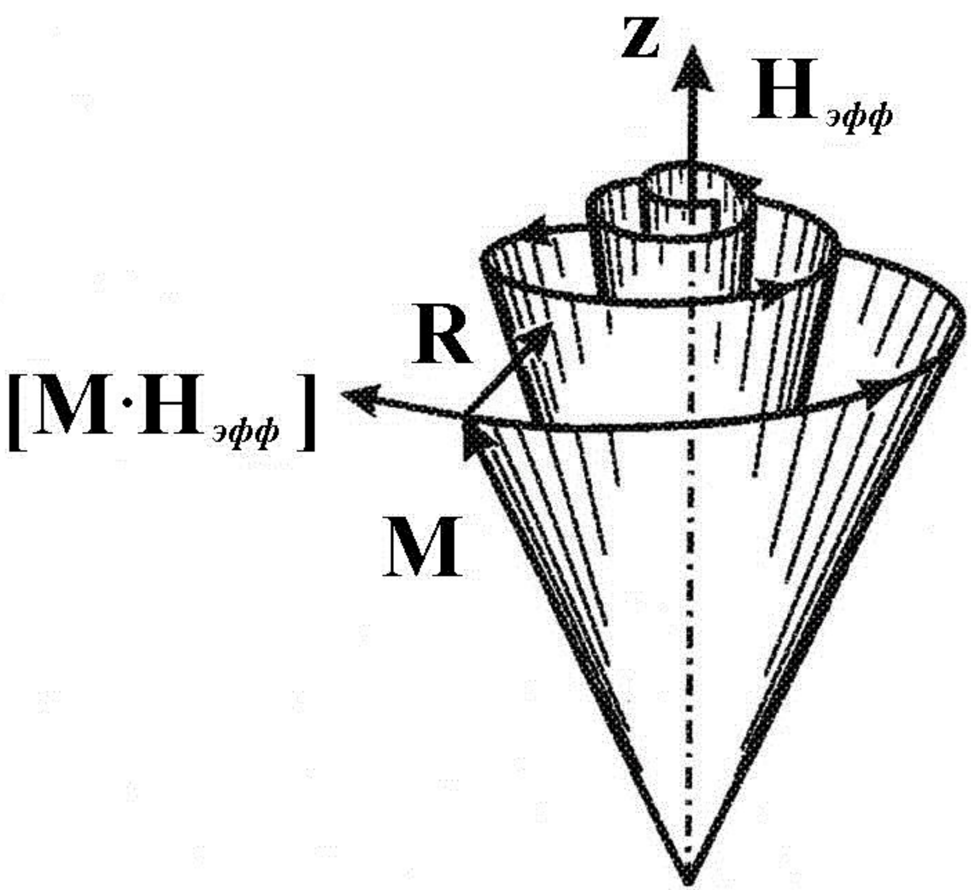
$H_{эфф}$ – эффективное поле

γ – гиромагнитное отношение

$M = (m_x, m_y, M_z)$; $m_x \sim m_y$, m_x, $m_y << M_z$, $M_z \sim M_o$

$H_{эфф} = (h_x, h_y, H_o)$; h_x, $h_y << H_o$,

Схема, иллюстрирующая затухание прецессионного движения намагниченности.



Получим компоненты тензора χ

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ h_x & h_y & H_o \\ m_x & m_y & M_z \end{vmatrix} + \varepsilon \left(\overrightarrow{H_{эфф}} - \frac{\left(\overrightarrow{H_{эфф}} \cdot \overrightarrow{\mathrm{M}}\right) \cdot \vec{M}}{M_o{}^2} \right)$$

$$\begin{cases} \dfrac{dm_x}{dt} = \gamma\left(M_z h_y - m_y H_o\right) + \varepsilon\left(h_x - \dfrac{m_x}{M_o{}^2}\left(h_x m_x + h_y m_y + H_o M_z\right)\right) \\ \dfrac{dm_y}{dt} = \gamma\left(m_x H_o - M_z h_x\right) + \varepsilon\left(h_y - \dfrac{m_y}{M_o{}^2}\left(h_x m_x + h_y m_y + H_o M_z\right)\right) \\ \dfrac{dM_z}{dt} = \gamma\left(m_y \cdot h_x - m_x \cdot h_y\right) + \varepsilon\left(H_o - \dfrac{M_z}{M_o{}^2}\left(h_x m_x + h_y m_y + H_o M_z\right)\right) \end{cases}$$

Заменим M_z на M_o

$$\begin{cases}
\dot m_x = \gamma M_o h_y - \gamma m_y H_o + \varepsilon\left(h_x - \dfrac{m_x}{M_o^{\,2}}\left(\cancelto{0}{h_x m_x} + \cancelto{0}{h_y m_y} + H_o M_o\right)\right) \\
\dot m_y = \gamma m_x H_o - \gamma M_o h_x + \varepsilon\left(h_y - \dfrac{m_y}{M_o^{\,2}}\left(\cancelto{0}{h_x m_x} + \cancelto{0}{h_y m_y} + H_o M_o\right)\right) \\
\dot M_z = \gamma\left(\cancelto{0}{m_y \cdot h_x} - \cancelto{0}{m_x \cdot h_y}\right) + \varepsilon\left(H_o - \dfrac{M_o}{M_o^{\,2}}\left(\cancelto{0}{h_x m_x} + \cancelto{0}{h_y m_y} + H_o M_o\right)\right) = \\
= \varepsilon\left(H_o - \dfrac{M_o H_o M_o}{M_o^{\,2}}\right) = 0
\end{cases}$$

Ищем решение в виде $m_x = m_{xo}e^{i\omega t}$, $m_y = m_{yo}e^{i\omega t}$, учтем, что $\dot{m}_x = i\omega m_x$ и $\dot{m}_y = i\omega m_y$. От коэффициентов при ε оставим только слагаемые, дающие наибольший вклад.

$$\begin{cases} i\omega m_x = \gamma M_o h_y - \gamma m_y H_o + \varepsilon\left(h_x - \dfrac{m_x H_o \cancel{M_o}}{M_o^{\cancel{2}}}\right) = \\ = \gamma M_o h_y - \gamma m_y H_o + \varepsilon h_x - \varepsilon \dfrac{m_x H_o}{M_o} \\ i\omega m_y = \gamma m_x H_o - \gamma M_o h_x + \varepsilon\left(h_y - \dfrac{m_y H_o \cancel{M_o}}{M_o^{\cancel{2}}}\right) = \\ = \gamma m_x H_o - \gamma M_o h_x + \varepsilon h_y - \varepsilon \dfrac{m_y H_o}{M_o} \end{cases}$$

Обозначим $\omega_o = \gamma H_o$, $\delta = \dfrac{\varepsilon H_o}{M_o}$

$$\begin{cases} i\omega m_x = \gamma M_o h_y - m_y \omega_o + \varepsilon h_x - \delta m_x \\ i\omega m_y = m_x \omega_o - \gamma M_o h_x + \varepsilon h_y - \delta m_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x(i\omega + \delta) + m_y \omega_o = \varepsilon h_x + \gamma M_o h_y \big| \cdot \omega_o \\ m_x \omega_o - m_y(i\omega + \delta) = \gamma M_o h_x - \varepsilon h_y \big| \cdot (i\omega + \delta) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x \omega_o (i\omega + \delta) + m_y \omega_o{}^2 = \varepsilon h_x \omega_o + \gamma M_o h_y \omega_o \\ m_x \omega_o (i\omega + \delta) - m_y (i\omega + \delta)^2 = \gamma M_o h_x (i\omega + \delta) - \varepsilon h_y (i\omega + \delta) \end{cases}$$

Вычитаем

$$\boxed{m_y\left((i\omega + \delta)^2 + \omega_o{}^2\right) = h_x(\varepsilon\omega_o - i\omega\gamma M_o - \delta\gamma M_o) + h_y(\gamma M_o \omega_o + i\omega\varepsilon + \delta\varepsilon)}$$

Домножим уравнения

$$\begin{cases} m_x(i\omega+\delta)+m_y\omega_o=\varepsilon h_x+\gamma M_o h_y \,\Big|\cdot(i\omega+\delta) \\ m_x\omega_o-m_y(i\omega+\delta)=\gamma M_o h_x-\varepsilon h_y \,\Big|\cdot\omega_o \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_x(i\omega+\delta)^2+m_y\omega_o(i\omega+\delta)=\varepsilon h_x(i\omega+\delta)+\gamma M_o h_y(i\omega+\delta) \\ m_x\omega_o^{\ 2}-m_y\omega_o(i\omega+\delta)=\gamma M_o h_x\omega_o-\varepsilon h_y\omega_o \end{cases}$$

Складываем

$$\boxed{m_x\left((i\omega+\delta)^2+\omega_o^{\ 2}\right)=h_x(i\varepsilon\omega+\varepsilon\delta+\gamma M_o\omega_o)+h_y(i\gamma M_o\omega+\gamma M_o\delta-\omega_o\varepsilon)}$$

Поскольку $\chi_{xx} = \dfrac{m_x}{h_x}$, $\chi_{xy} = \dfrac{m_x}{h_y}$, $\chi_{yx} = \dfrac{m_y}{h_x}$, $\chi_{yy} = \dfrac{m_y}{h_y}$,

то с учетом того, что $\gamma = \dfrac{\omega_o}{H_o}$, $\chi_o = \dfrac{M_o}{H_o}$,

$\varepsilon\delta \ll \gamma M_o \omega_o$, $\delta^2 \ll \omega^2, \omega_o^2$.

$$\chi_{xx} = \frac{\gamma M_o \omega_o + \cancelto{0}{\varepsilon\delta} + i\varepsilon\omega}{(i\omega+\delta)^2 + \omega_o^2} = \frac{\dfrac{\omega_o}{H_o} M_o \omega_o + i\varepsilon\omega \dfrac{H_o}{M_o} \cdot \dfrac{M_o}{H_o}}{\omega_o^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega} =$$

$$= \frac{\chi_o \omega_o^2 + i\delta\omega\chi_o}{\omega_o^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega} = \chi_o \frac{\omega_o^2 + i\delta\omega}{\omega_o^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega}$$

$$\chi_{yy} = \frac{\gamma M_o \omega_o + \cancelto{0}{\varepsilon\delta} + i\varepsilon\omega}{(i\omega + \delta)^2 + \omega_o^{\,2}} = \frac{\dfrac{\omega_o}{H_o} M_o \omega_o + i\varepsilon\omega \dfrac{H_o}{M_o} \cdot \dfrac{M_o}{H_o}}{\omega_o^{\,2} - \omega^2 + 2i\delta\omega} =$$

$$= \frac{\chi_o \omega_o^{\,2} + i\delta\omega\chi_o}{\omega_o^{\,2} - \omega^2 + 2i\delta\omega} = \chi_o \frac{\omega_o^{\,2} + i\delta\omega}{\omega_o^{\,2} - \omega^2 + 2i\delta\omega}$$

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \chi$$

Диагональные компоненты тензора χ равны

Недиагональные компоненты тензора χ

$$\chi_{xy}=\frac{\gamma M_o\delta-\omega_o\varepsilon+i\gamma M_o\omega}{(i\omega+\delta)^2+\omega_o{}^2}=\frac{\frac{\omega_o}{\cancel{H_o}}\cancel{M_o}\frac{\varepsilon \cancel{H_o}}{\cancel{M_o}}-\omega_o\varepsilon+i\gamma M_o\omega}{\omega_o{}^2-\omega^2+2i\delta\omega}=$$

$$=\frac{i\gamma M_o\omega}{\omega_o{}^2-\omega^2+2i\delta\omega}$$

$$\chi_{yx}=\frac{\omega_o\varepsilon-\gamma M_o\delta-i\gamma M_o\omega}{(i\omega+\delta)^2+\omega_o{}^2}=\frac{\omega_o\varepsilon-\frac{\omega_o}{\cancel{H_o}}\cancel{M_o}\frac{\varepsilon \cancel{H_o}}{\cancel{M_o}}-i\gamma M_o\omega}{\omega_o{}^2-\omega^2+2i\delta\omega}=$$

$$=-\frac{i\gamma M_o\omega}{\omega_o{}^2-\omega^2+2i\delta\omega}$$

$$\chi_{xy}=-\chi_{yx}=i\chi_a$$

$\boxed{\text{Тензор χ - эрмитовый}}$

- Компоненты тензора восприимчивости – комплексные, т.к. среда поглощает энергию магнитного поля. Диссипация энергии связана с мнимыми частями χ и χ_a.
- Получим действительные и мнимые части χ и χ_a. Учтем, что $\chi = \chi' - i\chi''$ и $\chi_a = \chi_a' - i\chi_a''$.

Диагональные компоненты

$$\chi' = \chi_o \frac{\omega_o^{\,2}\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right) + 2\delta^2\omega^2}{\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

действительная

$$\chi'' = \chi_o \frac{\delta\omega\left(\omega_o^{\,2} + \omega^2\right)}{\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

мнимая

$$\delta = \frac{\varepsilon H_o}{M_o}$$

Недиагональные компоненты

$$\chi_a' = -\frac{\gamma M_o \omega\left(\omega^2 - \omega_o^{\,2}\right)}{\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

мнимая

$$\chi_a'' = \frac{2\gamma M_o \delta\omega^2}{\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

действительная

Построим кривую $\chi_a''(\omega)$.
Упростим выражение $\chi_a''(\omega)$.

$$\chi_a'' = \frac{2\gamma M_o \delta \omega^2}{\omega_o^4 - 2\omega_o^2\omega^2 + \omega^4 + 4\delta^2\omega^2} = \frac{2\gamma M_o \delta \omega^2}{\omega^4 - 2\omega^2\left(\omega_o^2 - 2\delta^2\right) + \omega_o^4}$$

Обозначим $\omega^2 = x$, тогда

$$\chi_a''(\omega) = \chi_a''(x)$$

Пусть $A = 2\gamma M_o \delta$, $B = 2\left(\omega_o^2 - 2\delta^2\right)$, $C = \omega_o^4$

Тогда $$\chi_a''(x) = \frac{Ax}{x^2 - Bx + C}$$

Продифференцируем эту функцию

$$(\chi_a'')' = \frac{A\left(x^2 - Bx + C\right) - Ax\left(2x - B\right)}{\left(x^2 - Bx + C\right)^2} =$$

$$= \frac{A\left(x^2 - Bx + C - 2x^2 + Bx\right)}{\left(x^2 - Bx + C\right)^2} = \frac{A\left(-x^2 + C\right)}{\left(x^2 - Bx + C\right)^2}$$

Знак производной определяется знаком выражения

$$\left(-x^2 + C\right)$$

Поскольку $x=\sqrt{C}$, $x \geq 0$,

точка максимума $\omega = \omega_o$

x		$-\sqrt{C}$		$\sqrt{C}$	
$\chi_a''(x)$	$\searrow$		$\nearrow$	max	$\searrow$
$(\chi_a'')'(x)$	$-$	0	+	0	$-$

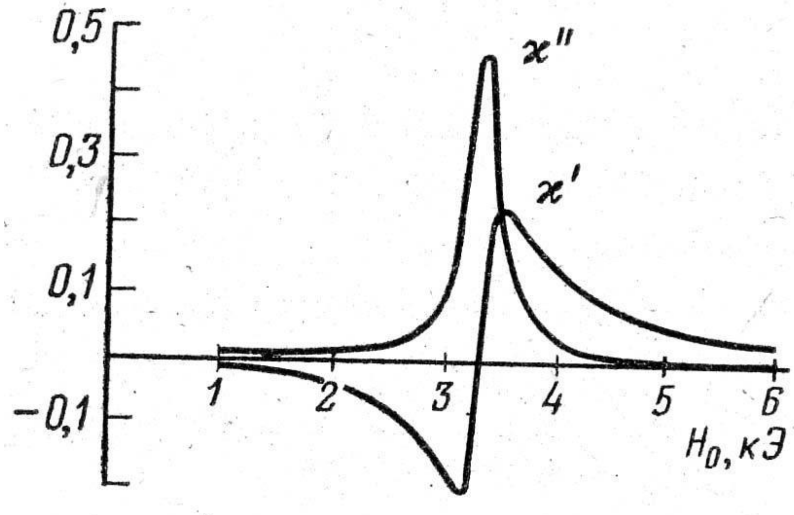
Сделаем обратную замену и определим значение функции χ_a'' в точке максимума

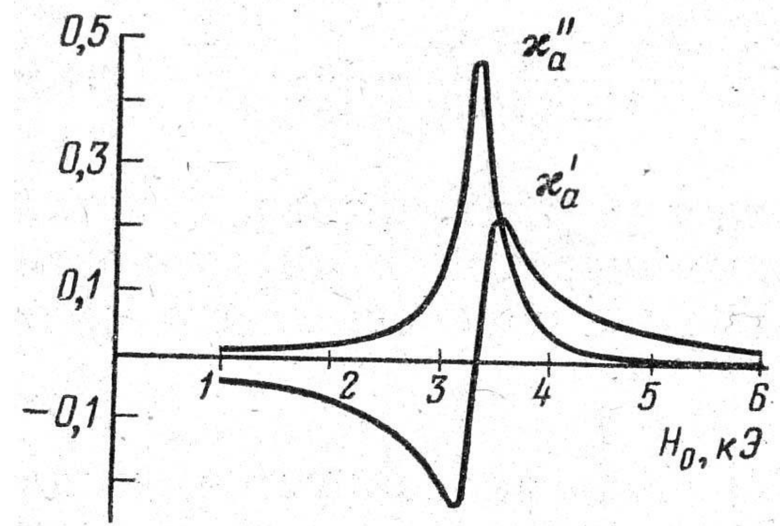
$$\chi_a'' = \frac{2\gamma M_o \delta \omega^2}{\left(\omega_o^{\,2} - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2} = \frac{2\gamma M_o \delta \omega_o^{\,2}}{4\delta^2 \omega_o^{\,2}} = \frac{\gamma M_o}{2\delta}$$

Увеличение δ приводит к уширению функции и уменьшению ее максимального значения.

Аналогичные исследования можно провести для $\chi_a'(\omega)$

Зависимости вещественных и мнимых частей компонент тензора χ от H_o (M_o=160 Гс, $\frac{\omega}{2\pi}$=9,4 ГГц, 2ΔH=170 Э)





Тензор магнитной проницаемости

$$[\mu] = \delta_{ik} + 4\pi[\chi]$$

$$[\mu] = \begin{vmatrix} 1 + 4\pi \dfrac{\gamma\omega_o M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} & 4\pi \dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} & 0 \\ -4\pi \dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} & 1 + 4\pi \dfrac{\gamma\omega_o M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Оценки: $\omega \approx 10^{13} \div 10^{14}$ Гц, $\omega_o \approx 10^{10}$ Гц, $\omega^2 >> \omega_o{}^2$

$$4\pi \frac{\gamma \omega_o M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} \approx 10^{-7}$$

$$4\pi \frac{\gamma \omega M_o}{\omega_o{}^2 - \omega^2} \approx 10^{-3}$$

Это обеспечивает вращение плоскости поляризации на 60 – 80 ^{o}/см.

Магнитная восприимчивость

Диамагнетики	**$\chi \cdot 10^6$**	**Парамагнетики**	**$\chi \cdot 10^6$**
Гелий He	–2,02	Натрий Na	16,1
Медь Cu	–5,41	Магний Mg	13,25
Серебро Ag	–21,5	Кальций Ca	44,0
Золото Au	–29,59	Платина Pt	189,0
CO_2 (газ)	–21		
H_2O (жидкость)	–13,0 (0°C)		
Анилин C_6H_7N	–62,95		
Бензол C_6H_6	–54,85		

- Используя уравнение Ландау-Лифшица, были получены компоненты тензоров χ и μ
- Эти тензоры являются эрмитовыми
- Спин-орбитальное взаимодействие – причина того, что $\boldsymbol{\mu_{xy} = -\mu_{yx}}$

Тензор магнитной восприимчивости

1. Уравнение Ландау-Лифшица без релаксационного члена.

a. Компоненты тензора магнитной восприимчивости.

2. Уравнение Ландау-Лифшица с релаксационным членом.

a. Компоненты тензора магнитной восприимчивости.

3. Тензор магнитной проницаемости.