



Исследование резонансных свойств джозефсоновского φ -0 перехода

Заявка на соискание грантов молодых ученых и специалистов ОИЯИ, стипендий им. М.Г.
Мещерякова и Н.Н. Говоруна на 2025 год

Д.А. Кокаев

**Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория информационных технологий им. М.Г. Мещерякова**

Дубна
2024

Актуальность работы

Аномальный эффект Джозефсона, который заключается в возникновении фазового сдвига Φ_0 в ток фазовом соотношении гибридных джозефсоновских структур, состоящих из сверхпроводников и магнетиков, приводит к возникновению конечного сверхпроводящего тока при нулевой джозефсоновской разности фаз. Примерами таких структур могут быть джозефсоновские переходы сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник или джозефсоновский переход связанный с наномагнитом. Такие джозефсоновские структуры называются Φ_0 переходами.

Активный интерес к исследованию таких структур вызван возможностью их практического применения в сверхпроводниковой электронике и спинтронике. Возникающая связь между магнитными и сверхпроводниковыми степенями свободы дает возможность взаимного контроля т.е. управления магнитными свойствами посредством сверхпроводящего тока или наоборот.

Одной из актуальных задач в этом направлении является исследование резонансных свойств Φ_0 перехода, поскольку на основе проявления резонансных свойств на вольт-амперных характеристиках можно экспериментально исследовать динамические особенности Φ_0 переходов.

Аномальный эффект Джозефсона

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] + \frac{\alpha}{M_0}[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}]$$

$$I = C \frac{dV}{dt} + \frac{\hbar}{2eR} \left(\frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\varphi_0}{dt} \right) + I_c \sin(\varphi - \varphi_0)$$

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \frac{K}{M_0} \left[Gr \sin \left(\varphi - r \frac{M_y}{M_0} \right) \mathbf{e}_y + \frac{M_z}{M_0} \mathbf{e}_z \right]$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$

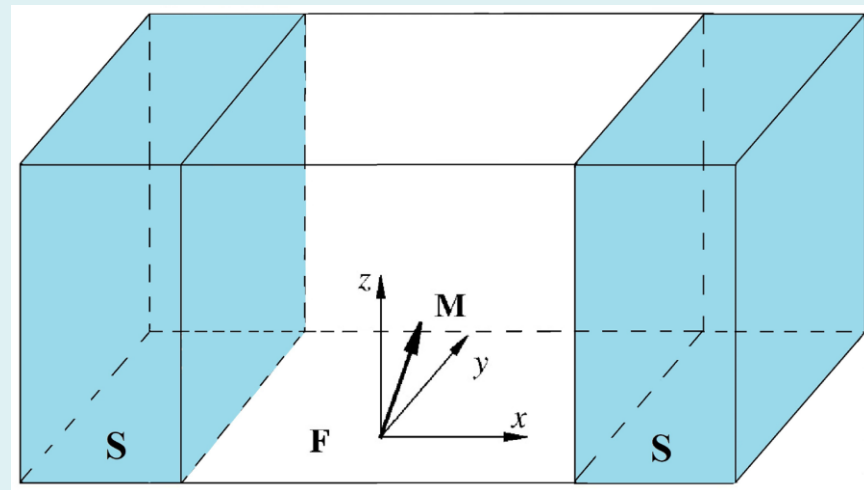
\mathbf{M} , M_0 - вектор и модуль намагниченности,

\mathbf{H}_{eff} - эффективное магнитное поле,

α - параметр Гильбертовского затухания,

γ - гироскопическое отношение,

r - параметр спин-орбитального взаимодействия



Математическая модель Джозефсоновского Фи-0 перехода

$$\frac{dm_x}{dt} = -\frac{\omega_F}{1 + \alpha^2} \{ (m_y h_z - m_z h_y) + \alpha [m_x (m_x h_x + m_y h_y + m_z h_z) - h_x] \},$$

$$\frac{dm_y}{dt} = -\frac{\omega_F}{1 + \alpha^2} \{ (m_z h_x - m_x h_z) + \alpha [m_y (m_x h_x + m_y h_y + m_z h_z) - h_y] \},$$

$$\frac{dm_z}{dt} = -\frac{\omega_F}{1 + \alpha^2} \{ (m_x h_y - m_y h_x) + \alpha [m_z (m_x h_x + m_y h_y + m_z h_z) - h_z] \},$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\beta_c} \left[I - \frac{d\varphi}{dt} + r \frac{dm_y}{dt} - \sin(\varphi - r m_y) \right],$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = V.$$

Компоненты эффективного поля

$$\begin{cases} h_x = 0 \\ h_y = Gr \sin(\varphi - r m_y) \\ h_z = m_z \end{cases}$$

Приближение параметрического осциллятора

Применяя следующее приближение -

$$m_y = \text{const} \approx 1, m_x \ll 1, m_z \ll 1, \varphi = \omega_J t, \zeta = \frac{\omega_F}{1+\alpha^2}, \alpha = 0$$

Можно переписать исходные уравнения компонент намагниченности в виде -

$$\begin{aligned} \frac{dm_x}{dt} &= -\omega_F m_z [1 - Gr \sin(\omega_J t - r)], \\ \frac{dm_z}{dt} &= \omega_F Gr m_x \sin(\omega_J t - r) \end{aligned}$$

Аналитическое решение уравнений динамики намагниченности

Из предыдущих уравнений можно получить

$$m_x = \frac{-\frac{dm_z}{dt} - \alpha m_z (S-1)}{S} \quad m_z = \frac{\frac{dm_x}{dt} + \alpha S}{S-1},$$

Пренебрегая m_x^2 , m_z^2 , $m_x m_z$ и взяв вторые производные от компонент намагниченности, получаем

$$\frac{d^2 m_x}{dt^2} + \omega_F^2 [Gr \sin(\omega_J t - r)]^2 m_x - \frac{dm_x}{dt} \frac{\omega_J Gr \cos(\omega_J t - r)}{(Gr \sin(\omega_J t - r) - 1)} = 0$$
$$\frac{d^2 m_z}{dt^2} + \omega_F^2 [Gr \sin(\omega_J t - r)]^2 m_z - \frac{dm_z}{dt} \omega_J \cot(\omega_J t - r) = 0$$

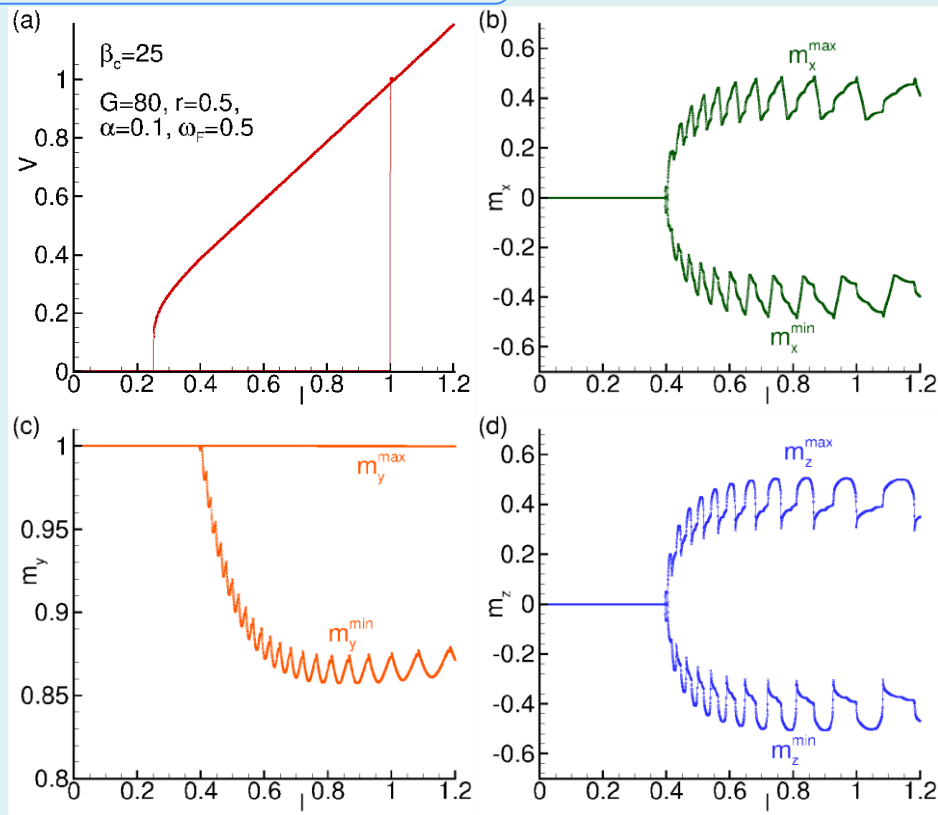
Численные результаты

$$\frac{d^2 m_x}{dt^2} + \omega_F^2 [Gr \sin(\omega_J t - r m_y)]^2 m_x - \frac{dm_x}{dt} \frac{\omega_J Gr \cos(\omega_J t - r m_y)}{(Gr \sin(\omega_J t - r m_y) - 1)} = 0$$

$$\frac{d^2 m_z}{dt^2} + \omega_F^2 [Gr \sin(\omega_J t - r m_y)]^2 m_z - \frac{dm_z}{dt} \omega_J \cot(\omega_J t - r m_y) = 0$$

Вид уравнений, полученных при аналитическом решении

Предполагаем возникновение параметрического резонанса



(a) ВАХ перехода $\phi=0$ для $G=80$; амплитуда компонентов (b) m_x , (c) m_y и (d) m_z вдоль ВАХ.

Список публикаций

Публикации в рецензируемых журналах

1. D. A. Kokaev, I. R. Rahmonov «Investigation of Resonance Properties of the Phi-0 Josephson Junction»
(направлено в журнал **PEPAN Letters**)

Участие в научных мероприятиях в 2024

1. International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024)

Investigation of Resonance Properties of the Φ -0 Josephson Junction

D. A. Kokaev, I. R. Rahmonov (докладчик)

<https://indico.jinr.ru/event/4343/>

1. Осенняя Школа по информационным технологиям ОИЯИ, 7-11 октября 2024

Инструментарий на основе Python-библиотек и экосистемы Jupyter для решения научных и прикладных задач (проведения практического занятия)

План работ на 2025

1. Исследование реализации параметрического резонанса в ϕ -0 переходе.
2. Исследование резонансных свойств системы наномагнитов связанных джозефсоновским переходом.

Спасибо за внимание!