

# **ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ**

**Устинин М.Н., Рыкунов С.Д., Бойко А.И.**

**Институт прикладной математики  
им. М.В.Келдыша РАН**

## **ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Многоканальные записи временных рядов – магнитных полей, измеренных снаружи изучаемого объекта**

## **ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Определить положение и зависимость от времени источников этих полей.**

**Функция объекта, с точки зрения данного исследования, состоит в генерации магнитного поля.**

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА – конфигурация источников в пространстве.**

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные данные получены на следующих установках:

- Градиометр 2-го порядка, 36 (9x4) каналов, НПО КРИОТОН, установлен в Институте радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия
- Градиометр 2-го порядка, 7 каналов, НПО КРИОТОН, установлен в НИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия
- Методы анализа данных разработаны в Институте математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия

# Разложение экспериментальных функций $\tilde{B}_k(t)$ в многоканальные ряды Фурье

$$a_{0k} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) dt, \quad a_{nk} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) \cos(2\pi \nu_n t) dt,$$

$$b_{nk} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) \sin(2\pi \nu_n t) dt,$$

$$B_k(t) = \frac{a_{0k}}{2} + \sum_{n=1}^N \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_{nk}), \quad \nu_n = \frac{n}{T}, \quad N = \nu_{\max} T,$$

$$\rho_{nk} = \sqrt{a_{nk}^2 + b_{nk}^2}, \quad \varphi_{nk} = \text{atan2}(a_{nk}, b_{nk})$$

Обратное преобразование Фурье для каждой частоты во всех каналах:

$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_{nk}), \quad k = 1, \dots, K$$

$$t \in [0, T_{\nu_n}], \quad T_{\nu_n} = \frac{1}{\nu_n} \quad \text{Частота когерентна, если фазы во всех каналах равны.}$$

Это приводит к разделению переменных:

$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_n)$$

Паттерн поля  $\rho_{nk}$  осциллирует как единое целое на частоте  $\nu_n$

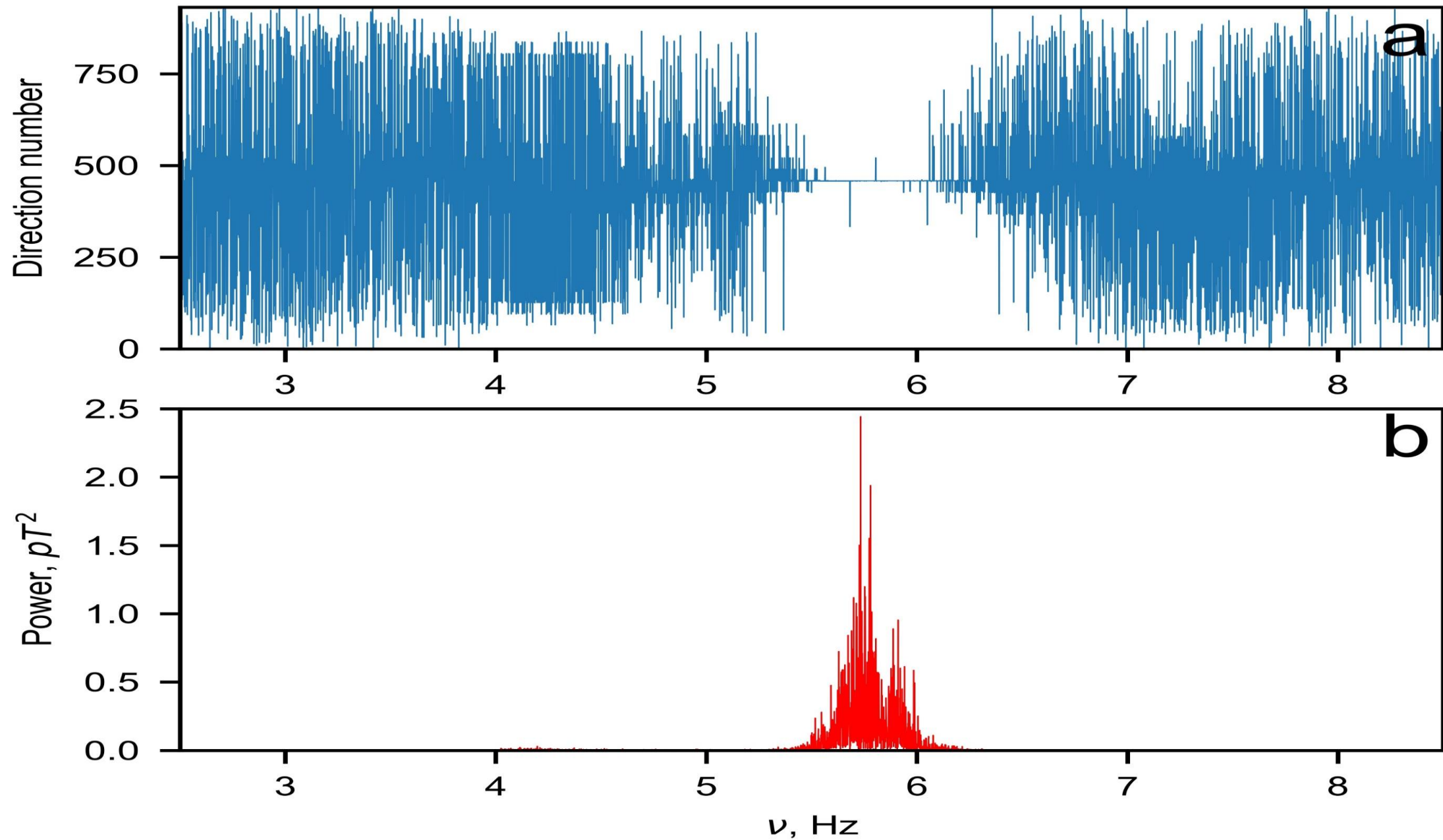
Функциональная томограмма строится по следующему алгоритму:

1. Преобразование Фурье входного многоканального сигнала.
2. Обратное преобразование Фурье – восстановление сигнала на каждой частоте.
3. Оценка когерентности на каждой частоте. Если когерентность близка к 1, то использовать паттерн и частоту, как когерентную осцилляцию, уравнение (4).
4. Если восстановленный сигнал состоит из нескольких смещенных по фазе когерентных осцилляций, то выделить эти осцилляции методом независимых компонент:
  - 4а. применить алгоритм слепой идентификации второго порядка (SOBI, [29]) для восстановления временных рядов в уравнении (3);
  - 4б. выбрать ненулевые компоненты;
  - 4с. применить прямое преобразование Фурье к каждой из выбранных компонент и вычислить амплитуду, нормированный паттерн и фазу, используя уравнение (4).

После четвертого шага этого алгоритма исходный многоканальный сигнал будет представлен в виде суммы элементарных когерентных осцилляций.

5. Вычисляются паттерны магнитных полей для множества тестовых диполей, равномерно распределенных в пространстве эксперимента.
6. Обратная задача для каждого экспериментального паттерна решается методом полного перебора – выбором наиболее похожего тестового паттерна.
7. Спектральная мощность или амплитуда экспериментальной частоты помещается в точку, найденную на шаге 6.
8. Выбирается преимущественное направление источников в данной точке.

# Distribution of directions in nano-particles

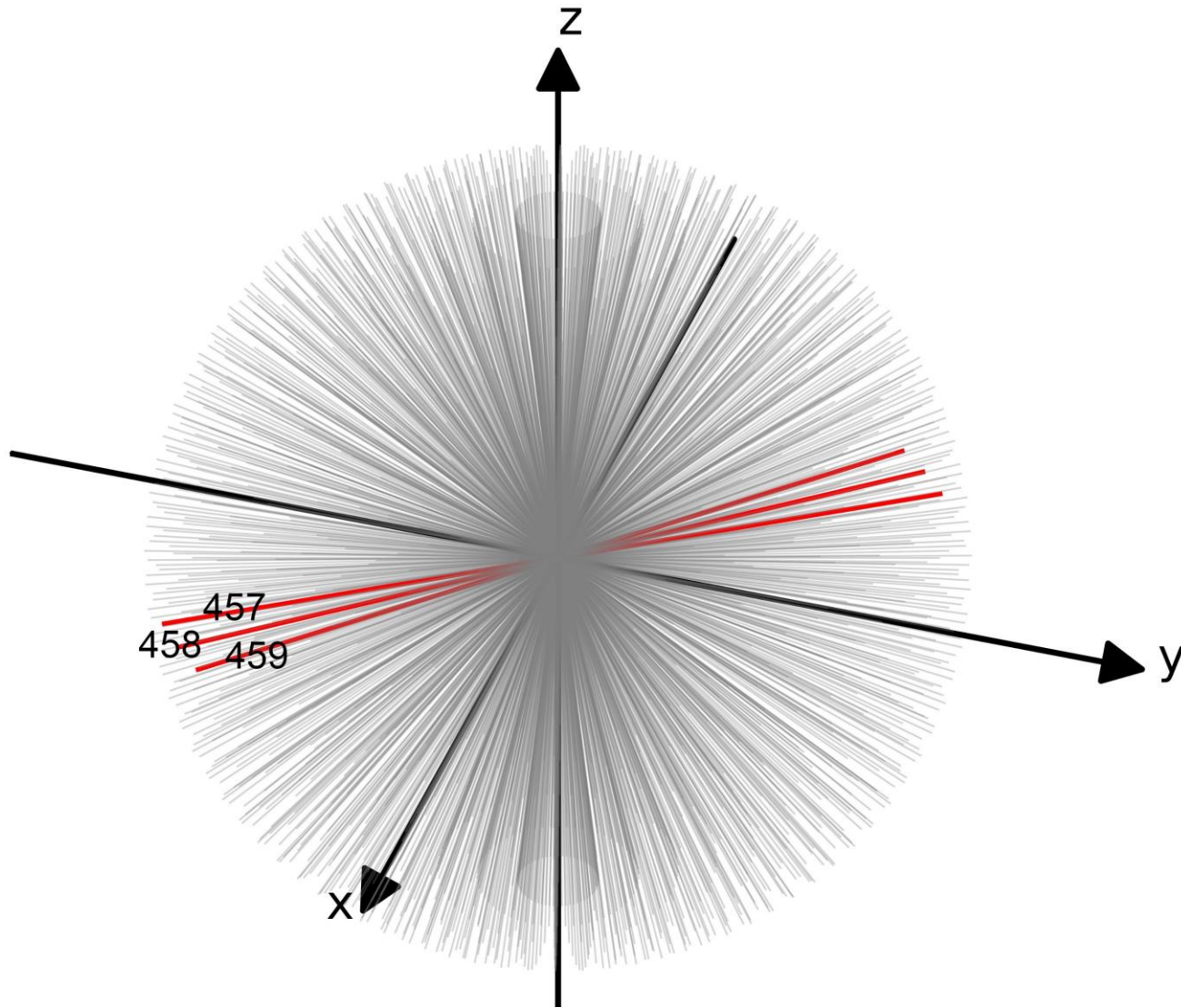


# Moving dipole (current-carrying circular loop)

- $\rho^2 \equiv x^2 + y^2$ ,  $r^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2$ ,  $\alpha^2 \equiv a^2 + r^2 - 2a\rho$ ,  $\beta^2 \equiv a^2 + r^2 + 2a\rho$ ,  $k^2 \equiv 1 - \frac{\alpha^2}{\beta^2}$ ,  $\gamma^2 \equiv x^2 - y^2$ ,  $C \equiv \frac{\mu_0 I}{\pi}$
- $\frac{dB_x}{dx} = \frac{Cz}{2\alpha^4\beta^3\rho^4} \{ [a^4(-\gamma(3z^2 + a^2) + \rho^2(8x^2 - y^2) - a^2(\rho^4(5x^2 + y^2) - 2\rho^2z^2(2x^2 + y^2) + 3z^4\gamma) - r^4(2x^4 + \gamma(y^2 + z^2))) ] E(k^2) + [a^2(\gamma(a^2 + 2z^2) - \rho^2(3x^2 - 2y^2)) + r^2(2x^4 + \gamma(y^2 + z^2))] \alpha^2 K(k^2) \}$
- $\frac{dB_x}{dy} = \frac{Cxyz}{2\alpha^4\beta^3\rho^4} \{ [3a^2(3\rho^2 - 2z^2) - r^4(2r^2 + \rho^2) - 2a^6 - 2a^2(2\rho^4 - \rho^2z^2 + 3z^4)] E(k^2) + [r^2(2r^2 + \rho^2) - a^2(5\rho^2 - 4z^2) + 2a^4] \alpha^2 K(k^2) \}$
- $\frac{dB_x}{dz} = \frac{Cx}{2\alpha^4\beta^3\rho^2} \{ [(\rho^2 - a^2)^2(\rho^2 + a^2) + 2z^2(a^4 - 6a^2\rho^2 + \rho^4) + z^4(a^2 + \rho^2)] E(k^2) - [(\rho^2 - a^2)^2 + z^2(\rho^2 + a^2)] \alpha^2 K(k^2) \}$
- $\frac{dB_y}{dx} = \frac{dB_x}{dy}$
- $\frac{dB_y}{dy} = \frac{Cz}{2\alpha^4\beta^3\rho^4} \{ [a^4(\gamma(3z^2 + a^2) + \rho^2(8y^2 - x^2) - a^2(\rho^4(5y^2 + x^2) - 2\rho^2z^2(2y^2 + x^2) - 3z^4\gamma) - r^4(2y^4 - \gamma(x^2 + z^2))) ] E(k^2) + [a^2(-\gamma(a^2 + 2z^2) - \rho^2(3y^2 - 2x^2)) + r^2(2y^4 - \gamma(x^2 + z^2))] \alpha^2 K(k^2) \}$
- $\frac{dB_y}{dz} = \frac{y}{x} \frac{dB_x}{dz}$
- $\frac{dB_z}{dx} = \frac{dB_x}{dz}$



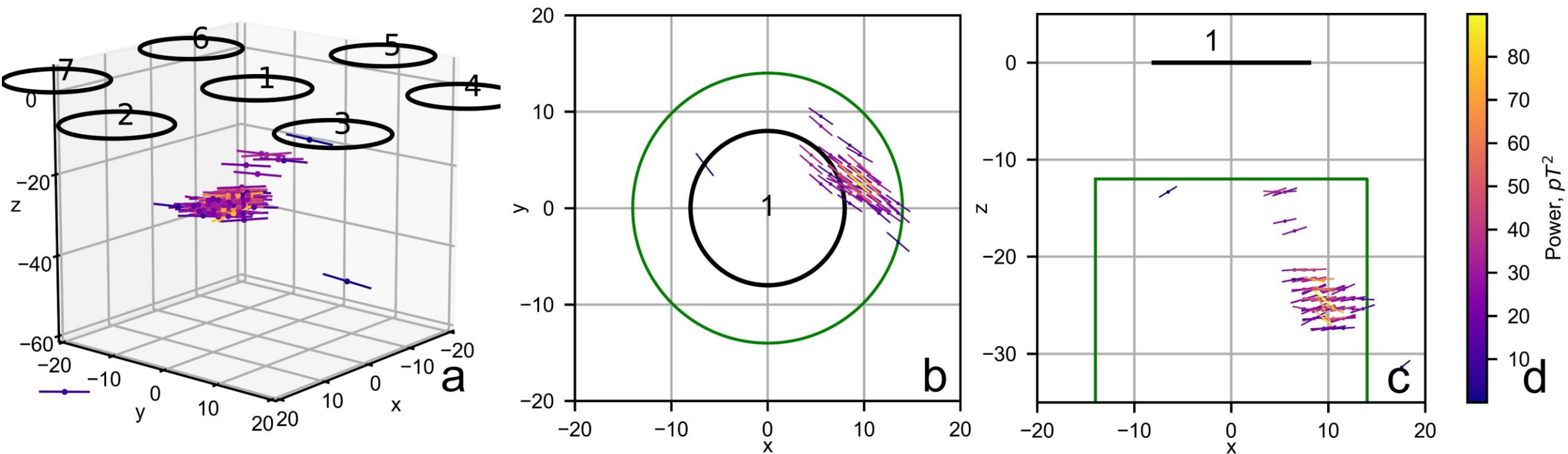
# Trial sources directions for current-carrying circular loop



In each spatial grid node set of 931 test sources is placed, covering full sphere. For each node directions set is the same, unlike current dipole case.

In the volume of  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  with the 1mm step over 900 millions of trial patterns are calculated.

# Sources' positions and directions in nano-particles



Работа выполнена при поддержке  
Российского научного фонда,  
грант 18-11-00178