

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Квантовая радиофизика

Лекция 10

Санкт-Петербург, 2017

Циклирование фазы



Выбор одной когерентности

- Приёмник: (0, 270, 180, 90)
- $\Delta p = -3$: (0, 270, 180, 90) \rightarrow (+, +, +, +)
- $\Delta p = -2$: (0, 180, 0, 180) \rightarrow (+, 0, -, 0)
- $\Delta p = -1$: (0, 90, 180, 270) \rightarrow (+, -, +, -)
- $\Delta p = 0$: (0, 0, 0, 0) \rightarrow (+, 0, -, 0)
- Однако
- $\Delta p = 1$: (0, 270, 180, 90) \rightarrow (+, +, +, +)
- Необходимо дополнительное циклирование

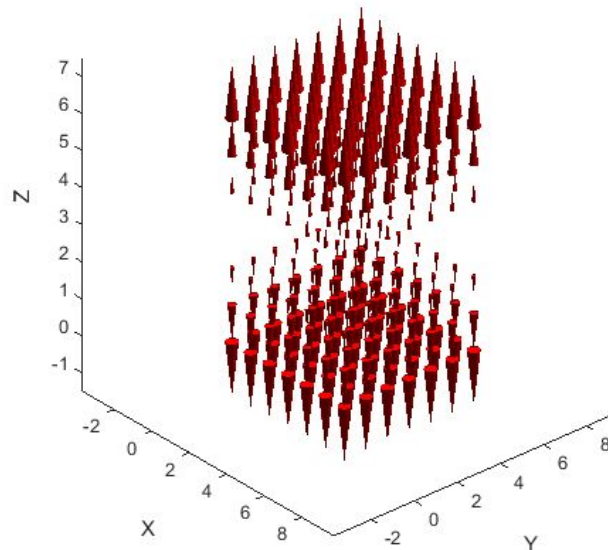
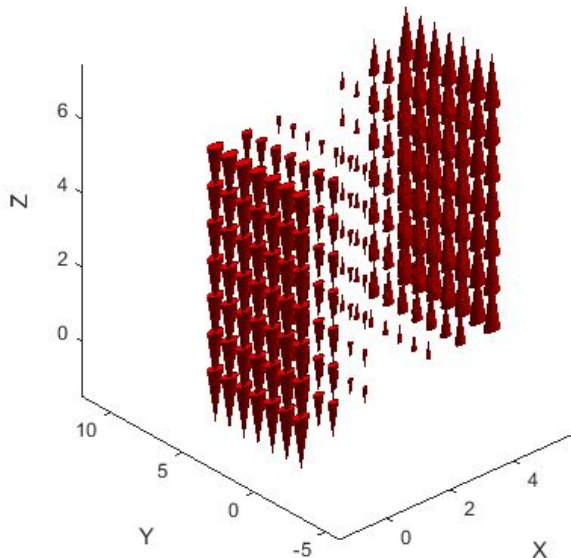
Пространственн
ая
чувствительност
ь ЯМР-
экспериментов



Градиенты магнитного поля

- Контролируемая неоднородность магнитного поля
- Изменение компоненты B_z вдоль осей x , y , z или иного направления

\vec{B}





Уравнения Блоха в присутствии градиента магнитного поля

- Во вращающейся системе координат, без учета релаксационных эффектов

$$\frac{d\mu_{\perp}}{dt} = -i\gamma(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})\mu_{\perp}$$

$$\frac{d\mu_z}{dt} = 0$$



FID в присутствии градиента магнитного поля

- Решение уравнений для намагниченности с начальными значениями продольной и поперечной компонент $\mu_z(0)$ и $\mu_\perp(0)$

$$\mu_\perp(t) = \mu_\perp(0)e^{-i\gamma(\mathbf{G}\cdot\mathbf{r})t}$$

$$\mu_z(t) = \mu_z(0)$$

- При сонаправленности градиента, например, оси x

$$\mu_\perp(t, x) = \mu_\perp(0)e^{-i\gamma Gxt}$$



Спектр FID в присутствии градиента B_z

- Сигнал (от всего образца)

$$\mu_{\perp}(t) = \int \mu_{\perp}(0, x) e^{-i\gamma G x t} dx$$

- Спектр

$$\mu_{\perp}(\gamma G x) = \mu_{\perp}(0, x)$$



Спектр FID в присутствии градиента B_z

- Сигнал (от всего образца)

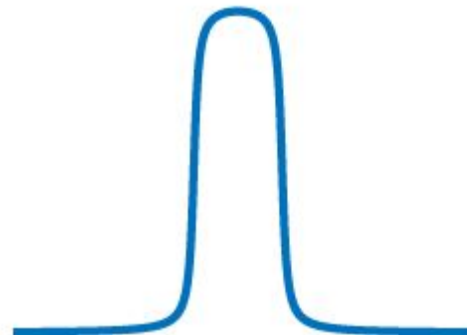
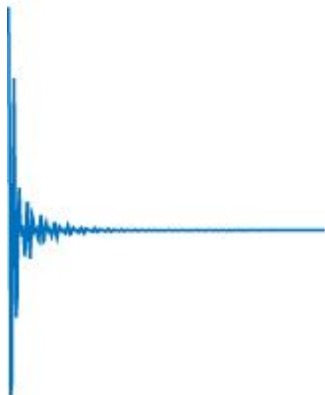
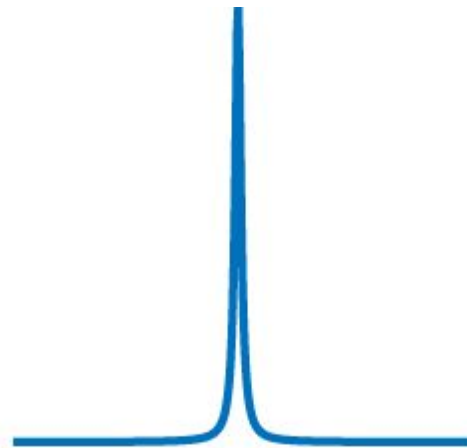
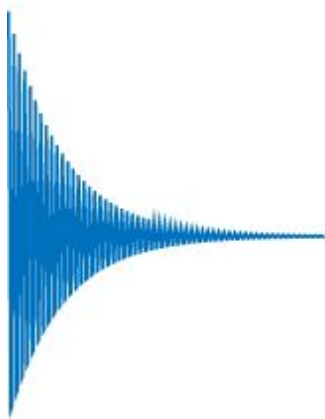
$$\mu_{\perp}(t) = \int \mu_{\perp}(0, x) e^{-i\gamma G x t} dx$$

- Спектр

$$\mu_{\perp}(\gamma G x) = \mu_{\perp}(0, x)$$



FID в присутствии градиента B_z



Чувствительность ЯМР-экспериментов к движению



Движение частиц при воздействии градиента

- $x=x(t)$

$$\frac{d\mu_{\perp}}{dt} = -i\gamma Gx(t)\mu_{\perp}$$

$$\mu_{\perp}(t, x) = \mu_{\perp}(0)e^{-i\gamma \int Gx(t)dt}$$

- Рассмотрим разложение $x(t)$ в ряд

$$x(t) = x_0 + \frac{\partial x}{\partial t}t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}t^2 + \dots$$



Фаза сигнала при движении частиц

- Фазовые члены в выражении для намагниченности

$$\int Gx(t) dt = x_0 \int G dt + \frac{\partial x}{\partial t} \int Gt dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \int Gt^2 dt + \dots$$

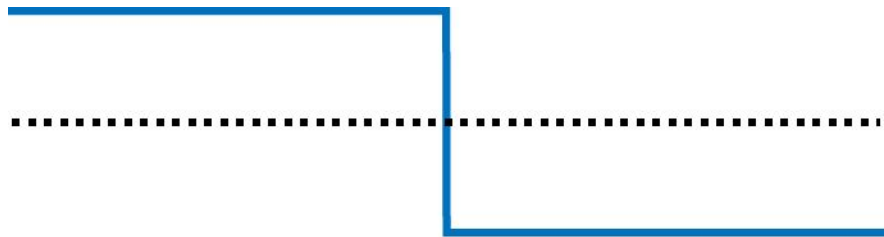
- Можно подобрать форму $G=G(t)$ таким образом, чтобы выполнялось одно или несколько равенств

$$\int G(t) dt = 0 \quad \int G(t)t dt = 0 \quad \int G(t)t^2 dt = 0$$



Метод обнуления моментов градиентов

- Устранение чувствительности к производной координаты



$$\int G(t) dt = 0 \quad \int G(t)t dt \neq 0$$

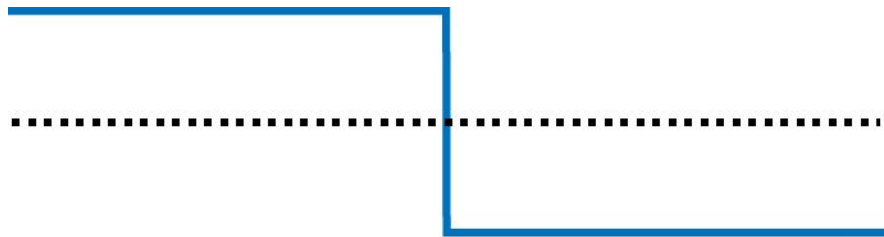


$$\int G(t) dt = 0 \quad \int G(t)t dt = 0$$



Метод обнуления моментов градиентов

- Устранение чувствительности к производной координаты



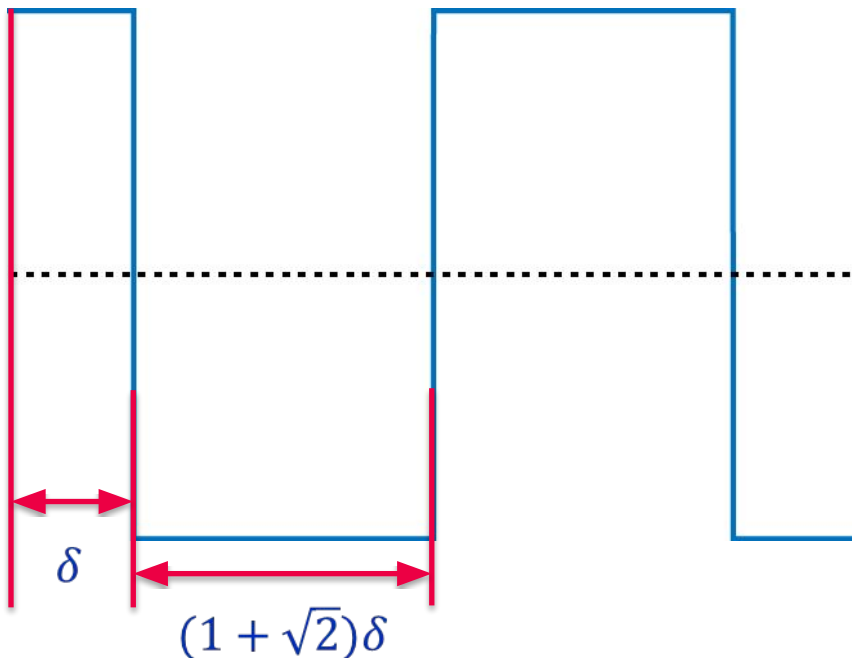
$$\int G(t) dt = 0 \quad \int G(t)t dt \neq 0$$



$$\int G(t) dt = 0 \quad \int G(t)t dt = 0$$

Метод обнуления моментов градиентов

- Устранение чувствительности к ускорению



$$\int G(t) dt = 0$$

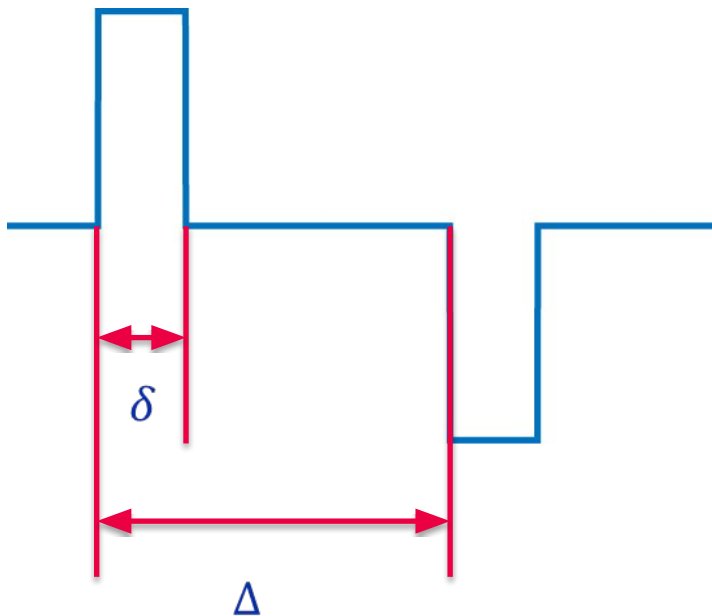
$$\int G(t)t dt = 0$$

$$\int G(t)t^2 dt = 0$$



Измерение скорости фазовым методом

- Используется последовательность с импульсным градиентом с нулевым первым моментом
- Предполагается ламинарный поток



$$\int Gx(t) dt = \frac{\partial x}{\partial t} \int G(t)t dt$$



Вклад скорости в фазу сигнала

- Выражение для сигнала ЯМР

$$\mu_{\perp}(TE) = \mu_{\perp}(0)e^{-i\gamma G\delta\Delta v}$$

- Два эксперимента с импульсами градиента разной полярности (вариант +G/-G или +G/0)

$$\Delta\varphi = 2v\gamma G\delta\Delta$$

- Точность определения фазы = $\pm\pi$

$$v_{enc} = \frac{\pi}{2\gamma G\delta\Delta}$$



Диффузия в ЯМР

- Уравнения Блоха с учетом диффузии

$$\frac{d\mu_{\perp}}{dt} = -i\gamma(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})\mu_{\perp} + \nabla \mathbf{D} \nabla \mu_{\perp}$$