

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Квантовая радиофизика

Лекция 6

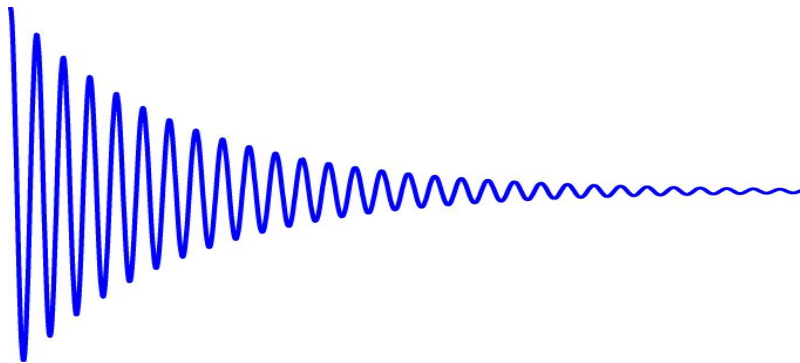
Санкт-Петербург, 2017

Многоимпульсные методы ЯМР

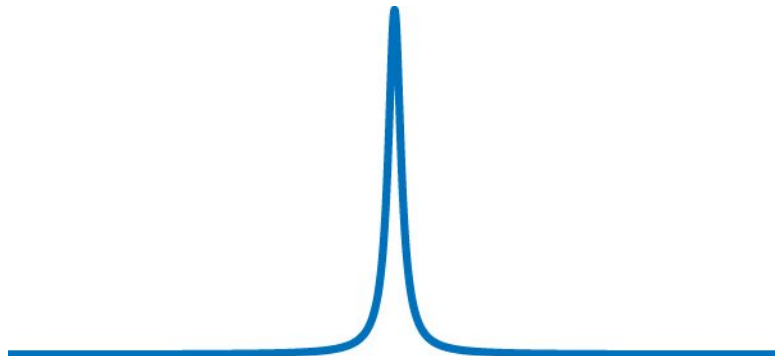


Спад намагниченности и его спектр

- FID

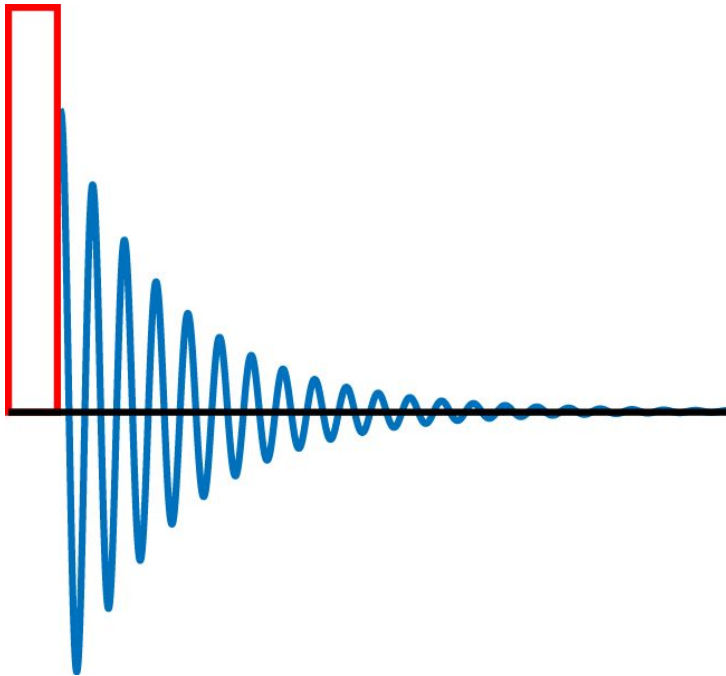


- Спектр FID





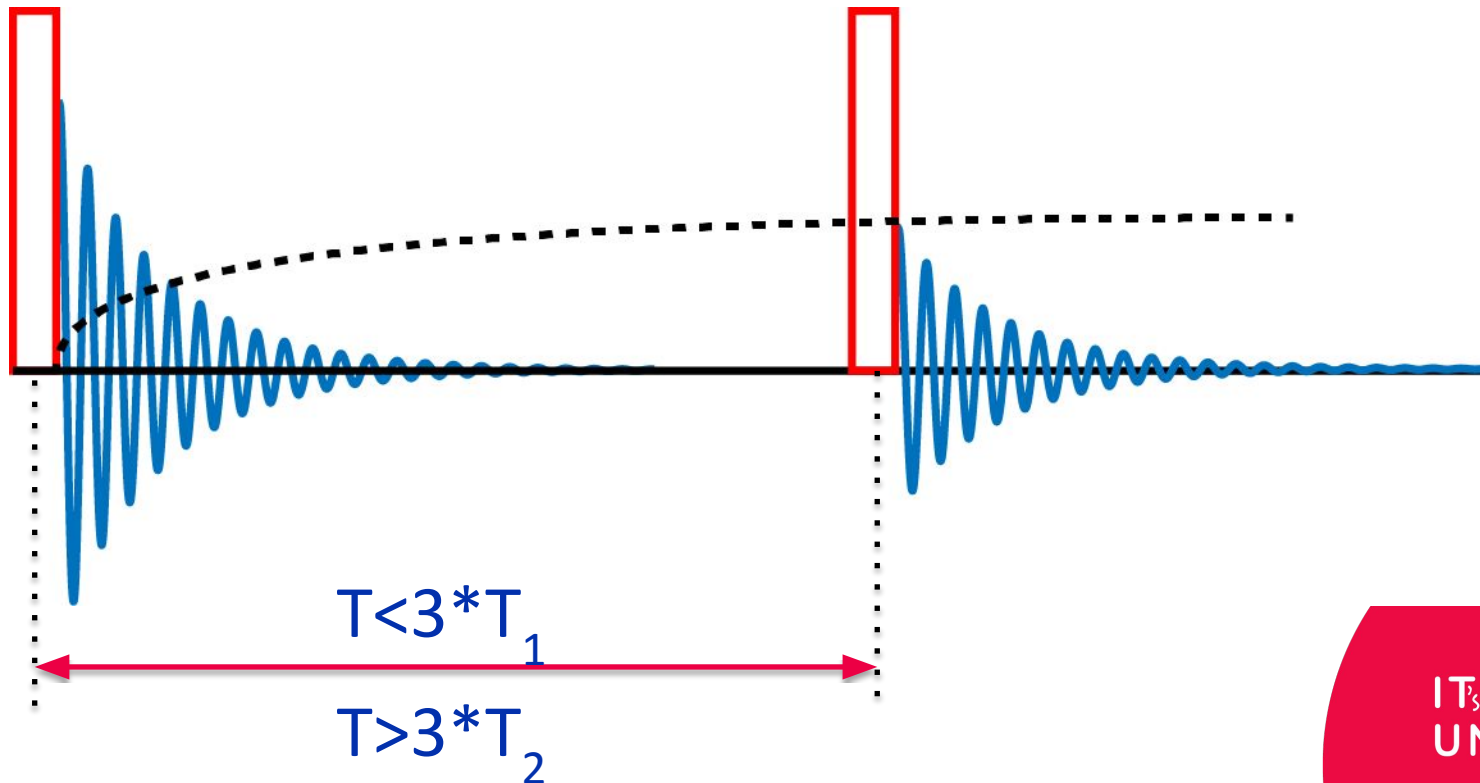
Одноимпульсная спектроскопия



- Измерение химического сдвига
- Измерение T_2^* или T_2

Измерение T_1

- Последовательность 90-90





Величина сигнала

- Продольная намагниченность до второго РЧ-импульса

$$M_z(90_{-2}) = M_0 \left(1 - e^{-\frac{T}{T_1}} \right)$$

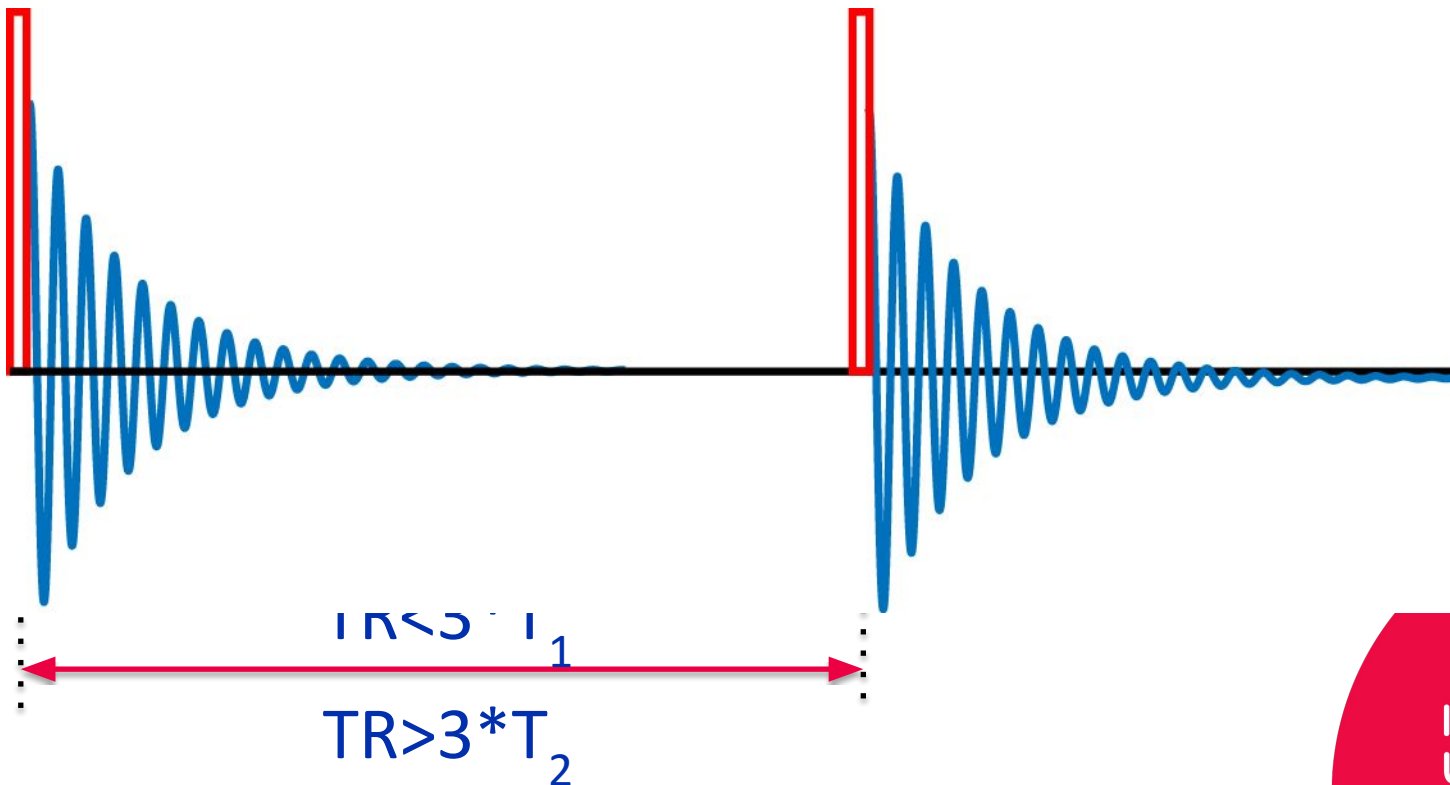
- Интенсивность сигнала после второго РЧ-импульса

$$M_x(90_{+2}) = M_0 \left(1 - e^{-\frac{T}{T_1}} \right)$$



Последовательное насыщение

- Последовательность α - α





Продольная намагниченность в квазистационарном состоянии

- Последовательность α - α

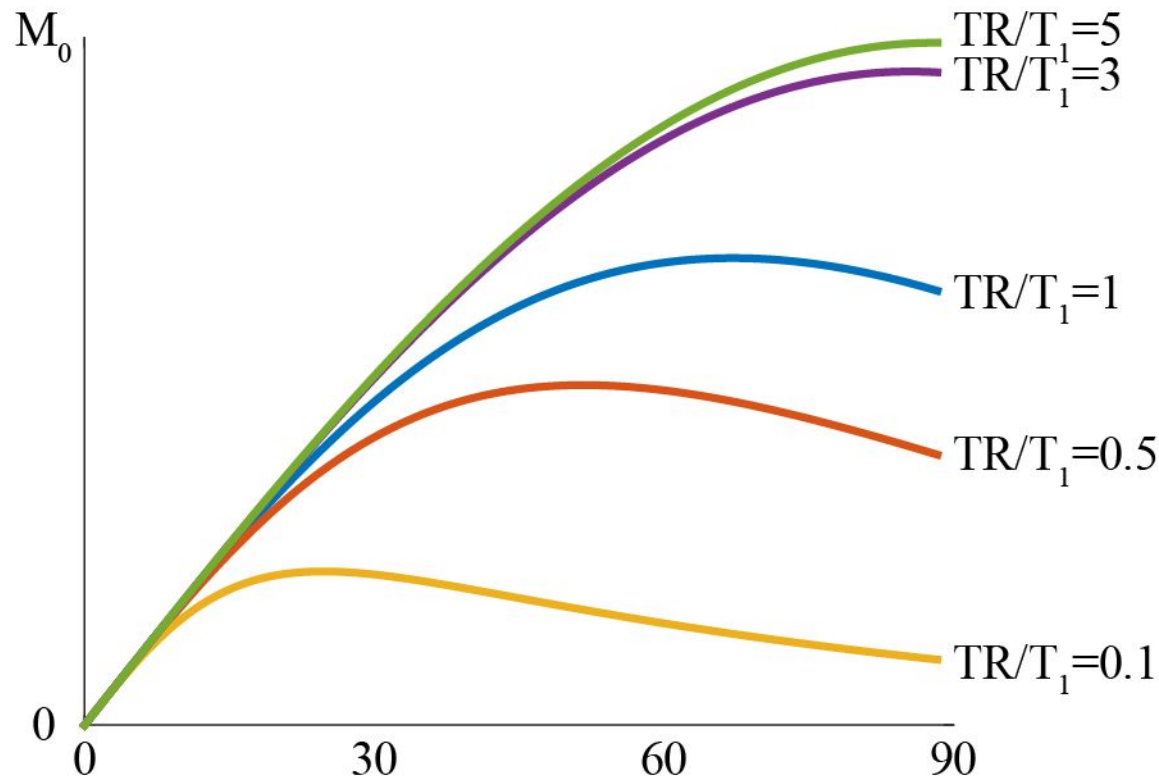
$$M_z(0_+) = M_0 \cos \alpha \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR}{T_1}}\right)}{\left(1 - \cos \alpha e^{-\frac{TR}{T_1}}\right)}$$

$$M_x(0_+) = M_0 \sin \alpha \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR}{T_1}}\right)}{\left(1 - \cos \alpha e^{-\frac{TR}{T_1}}\right)}$$



Интенсивность сигнала

- Зависимость от соотношения TR/T_1





Сигнал в квазистационарном состоянии

- При $\alpha=90^\circ$

$$M_x(0_+) = M_0 \left(1 - e^{-\frac{TR}{T_1}} \right)$$

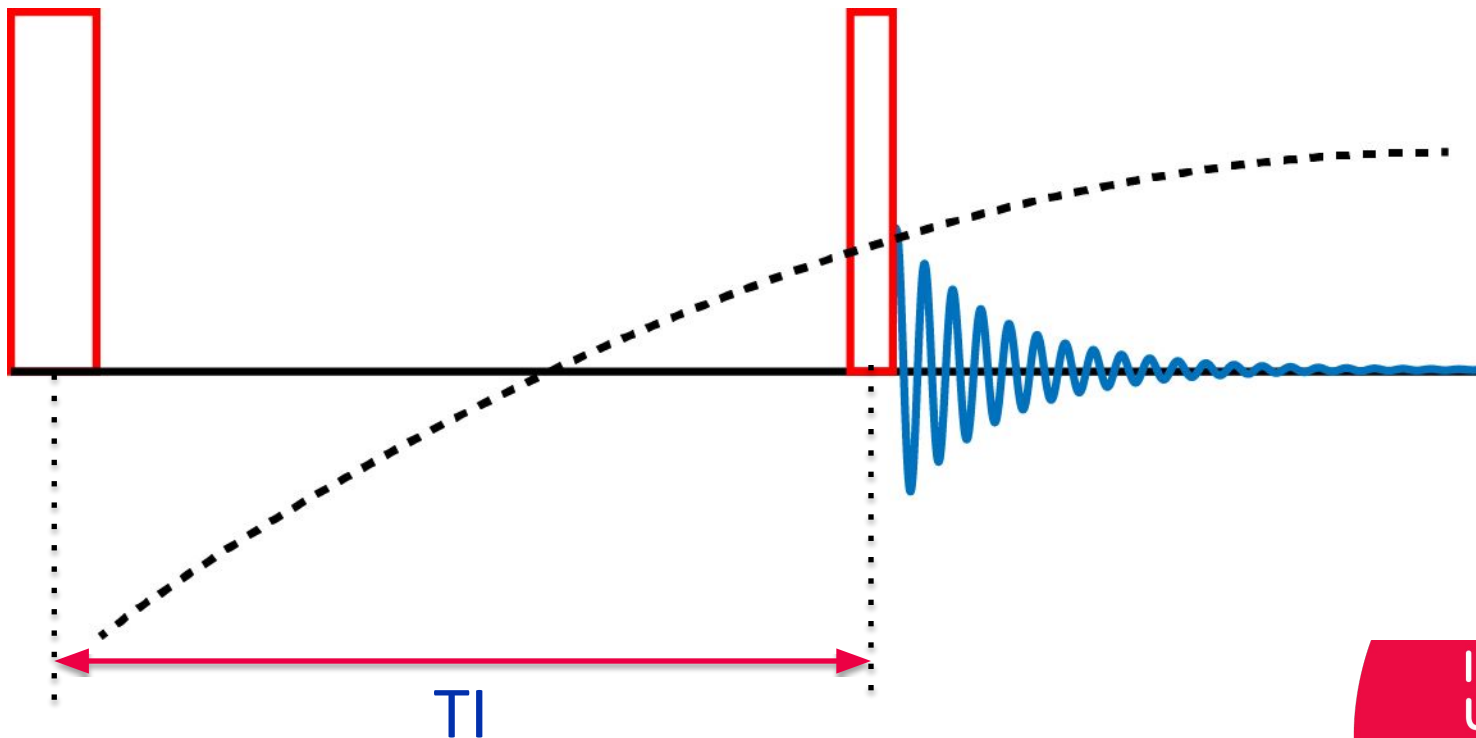
- Угол Эрнста

$$\cos \alpha_E = e^{-\frac{TR}{T_1}}$$



Инверсия-восстановление

- Последовательность 180-90





Инверсия-восстановление

- Амплитуда сигнала

$$M_x(90_+) = M_0 \left(1 - 2e^{-\frac{TI}{T_1}} \right)$$

- Нуль-метод

$$T_1 = \frac{TI_0}{\ln 2}$$



Спиновое эхо

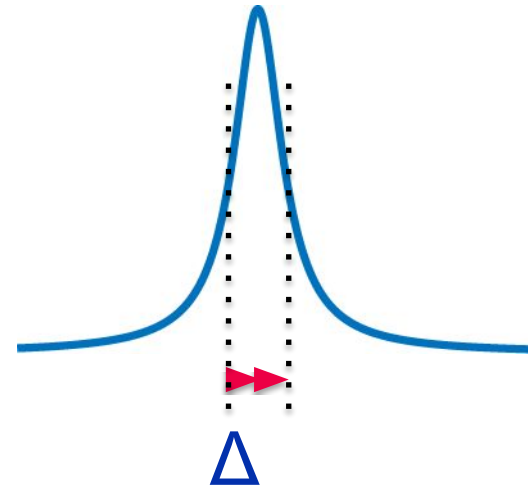
- Спад сигнала с постоянной времени T_2^*



- Сигнал восстановим после затухания

Эхо в последовательности 90-90

- Спектр частот $\pm\Delta\omega$
- Два импульса, разнесенные более чем на $2\pi/\Delta\omega$ порождают эхо-сигнал
- Амплитуда сигнала



$$M_x(t) = \frac{M_0}{2} \left[\frac{\sin(\Delta\omega(t - 2\tau))}{(t - 2\tau)} - \frac{\sin(\Delta\omega t)}{t} \right]$$



Эхо в последовательности 90-180

- Амплитуда сигнала

$$M_x(t, \Delta\omega) = M_0 \cos(\Delta\omega[\tau_1 - \tau_2])$$

- Любое распределение частот
- Любое разнесение импульсов



Спиновое эхо

- Поведение намагниченности

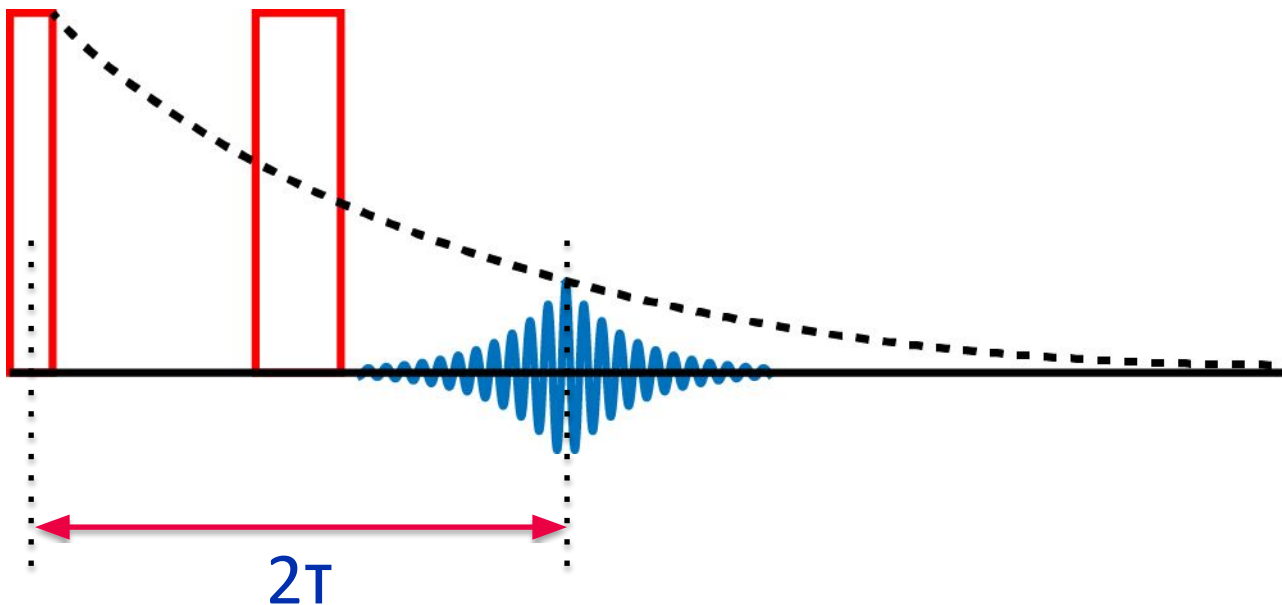




Релаксация при 90-180

- Амплитуда сигнала

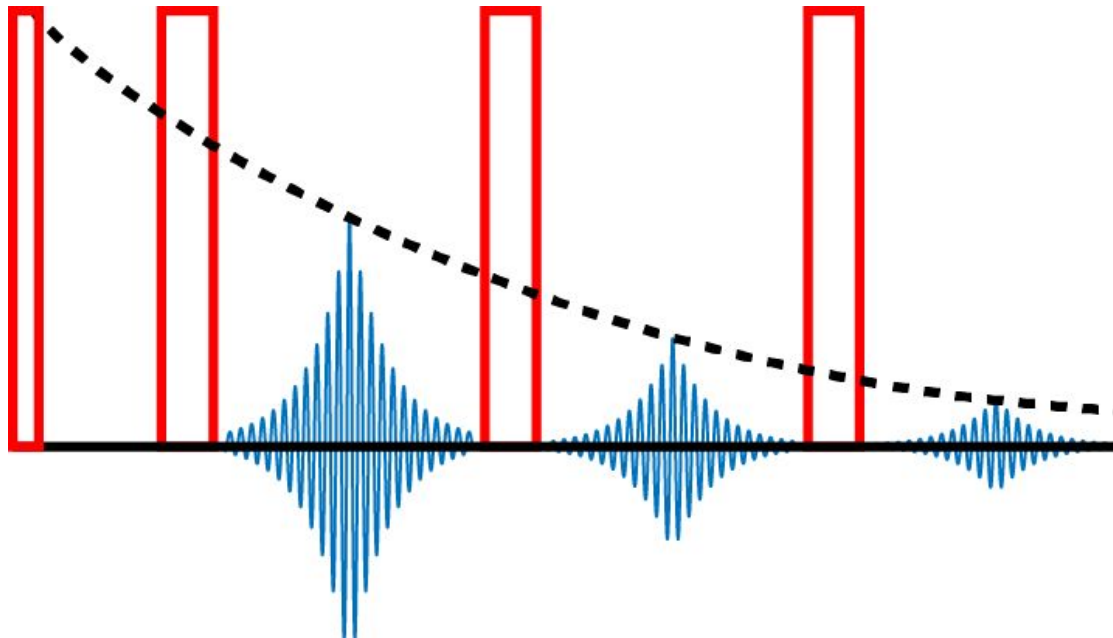
$$M_x(2\tau) = M_0 e^{-\frac{2\tau}{T_2}}$$





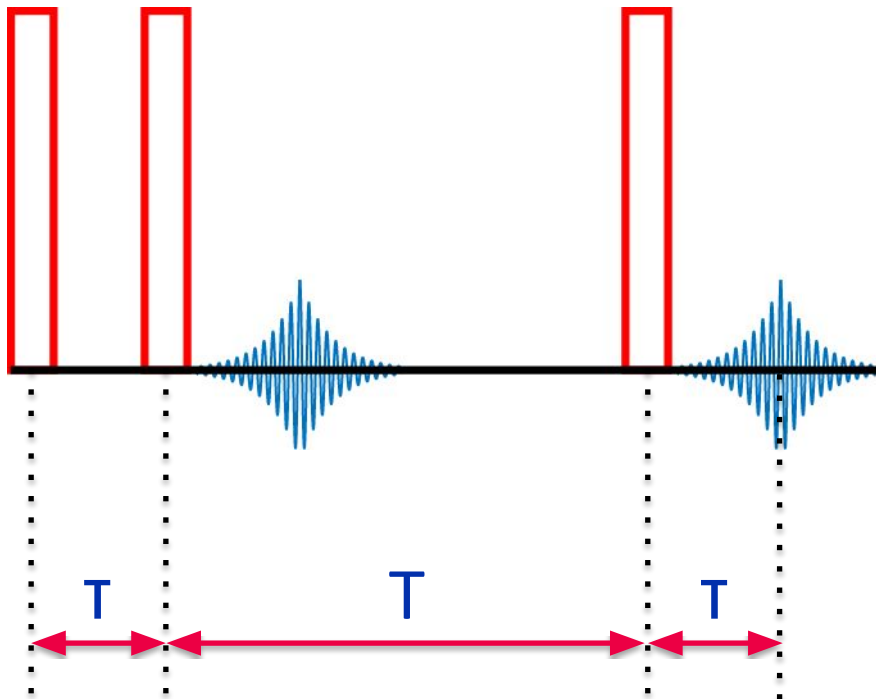
Последовательность 90-180-180-...

- Возможна вторая и более высокие рефокусировки намагниченности



Стимулированное эхо 90-90-90

- Второе эхо в последовательности 90-90-90





Стимулированное эхо 90-90-90

- Амплитуда сигнала

$$M_x(2\tau) = \frac{M_0}{2} e^{-\frac{T}{T_1}} e^{-\frac{2\tau}{T_2}}$$



Сигналы в последовательности α - α - α

- 5 сигналов эха

