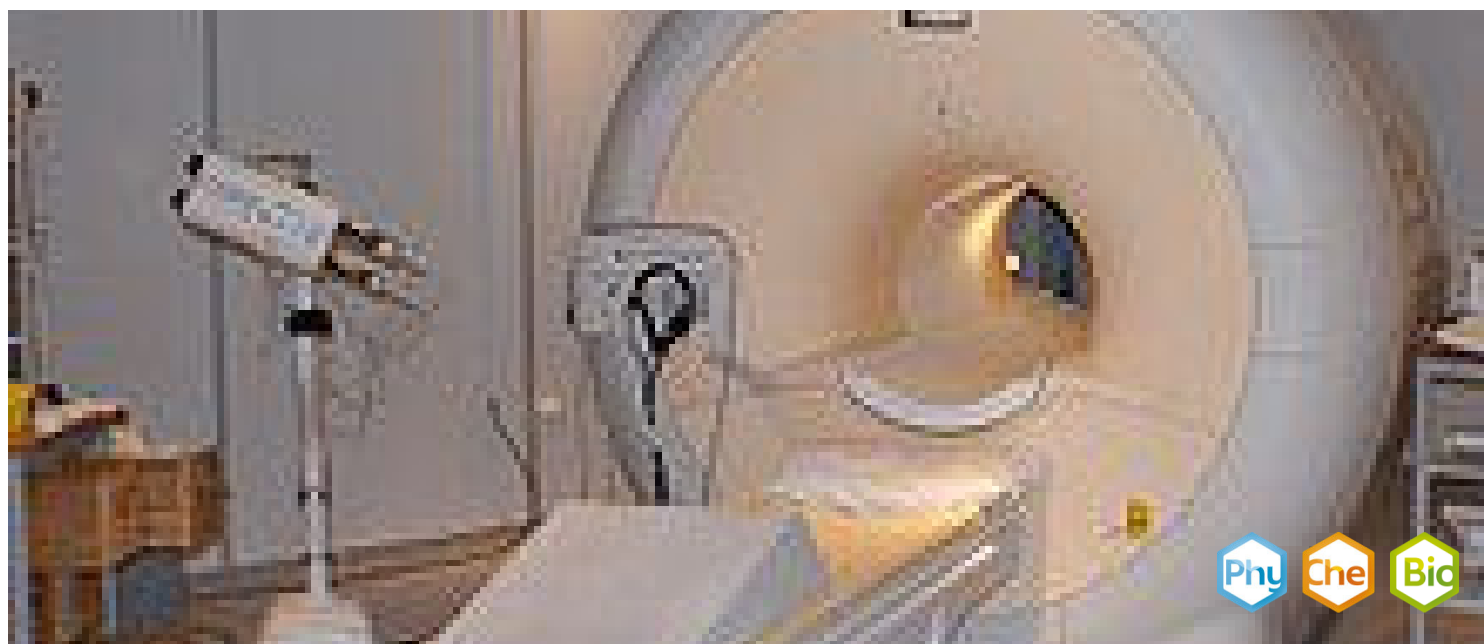


# Время релаксации в ядерном магнитном резонансе



Физика

Современная физика

Квантовая физика

Химия

Аналитическая химия

Ядерный магнитный резонанс

Биология

Современные методы обработки изображений

Прикладные науки

Медицина

Нервная система

Прикладные науки

Медицина

Радиология и ультразвуковая диагностика

Магнитно-резонансная томография (МРТ)



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

2



Время подготовки

10 Минут



Время выполнения

45+ Минут

This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/5f7f62397fb8b40003cb5645>

PHYWE

## Общая информация



## Приложение

PHYWE



Медицинская МРТ

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) применяется в:

- **Медицина:** Основанная на принципах ЯМР, магнитно-резонансная томография (МРТ) используется для медицинской диагностики без облучения тела.
- **Биомедицина:** ЯМР используется для изучения и определения структур и функций важных биологических молекул, таких как лекарства.
- **Пищевая промышленность:** Этот метод позволяет получить информацию о химическом составе и структуре компонентов пищевых продуктов без разрушения образца.

## Дополнительная информация (1/5)

PHYWE

### предварительные знания



В присутствии магнитного поля ядра выравниваются либо с приложенным магнитным полем, либо против него. Разница энергий между двумя состояниями приводит к суммарной спиновой намагниченности вдоль направления  $B_0$ . Информация в ЯМР доставляется прецессией намагничивания спина вокруг магнитного поля на ядре, с угловой частотой  $\omega = -\gamma B$ , где  $\gamma$  - это гиромагнитное соотношение.

## Дополнительная информация (2/5)

PHYWE

### Научный принцип



Эксперименты проводятся непосредственно с тренажером (тренировочным модулем) МРТ. Этот блок позволяет непосредственно исследовать небольшие образцы в камере с образцом. Управление прибором осуществляется с помощью поставляемого программного обеспечения. Основные эксперименты включают настройку частоты системы, которая применяется перпендикулярно магнитному полю  $\vec{B}_0$  в виде ВЧ-импульса к ларморовской частоте, определение угла отклонения вектора намагничивания по длительности ВЧ-импульса, влияние количества вещества на так называемый FID-сигнал (спад свободной индукции), влияние неоднородностей специального магнитного поля, измерение спинового эхо-сигнала и процедура усреднения для максимизации соотношения сигнал-шум. Настройка всех этих параметров необходима для получения высококачественного МР-изображения.

## Дополнительная информация (3/5)

PHYWE

Цель  
обучения

## Задачи



Целью этих экспериментов является демонстрация и понимание фундаментальных принципов ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

**А: Оценка времени релаксации  $T_1$** 

1. Изучите влияние времени повторения двух ВЧ-импульсов  $90^\circ$  на регистрируемый сигнал.
2. Уменьшите время повторения до тех пор, пока записанная амплитуда сигнала не будет соответствовать приблизительно половине максимальной амплитуды, и используйте приблизительный период полураспада спин-решеток для расчета приблизительного времени релаксации воды.
3. Сравните предполагаемое время релаксации воды и масла, а затем прокомментируйте свои результаты.

## Дополнительная информация (4/5)

PHYWE

## Задачи

**В: Измерение времени релаксации  $T_1$** 

1. Запишите экспоненциальную кривую релаксации  $T_1$  масла. Изучить влияние времени повторения, шага времени и количества точек на кривой релаксации.
2. Запишите идеальную кривую релаксации  $T_1$  и сопоставьте ход сигнала с программой *FIT*, реализованной в программном обеспечении. Считайте время релаксации  $T_1$  масла и распечатайте график.
3. Повторите эти измерения для воды. Считайте время релаксации  $T_1$  воды на соответствующей кривой *FIT* и распечатать график.

## Дополнительная информация (5/5)

PHYWE

### Задачи



#### С: Измерение времени релаксации $T_2$

1. Изучите влияние времени и количества эхо-сигналов на экспоненциальную кривую релаксации  $T_2$  масла.
2. Запишите идеальную кривую релаксации  $T_2$  и установите ход сигнала с помощью процедуры *FIT*, реализованной в программном обеспечении. Считайте время релаксации  $T_2$  масла и распечатайте график.
3. Повторите эти измерения для воды. Определите время релаксации  $T_2$  воды на соответствующей кривой *FIT* и распечатайте график.

## Инструкции по технике безопасности

PHYWE

Для этого эксперимента применяются общие инструкции по безопасному проведению экспериментов при преподавании естественных наук.

Правила работы с опасными веществами приведены в соответствующих паспортах безопасности

Беременные женщины, а также люди с кардиостимуляторами должны находиться на расстоянии не менее 1 м от магнита.

## Теория (1/20)

PHYWE

Экспериментальный комплект "Основные принципы ядерного магнитного резонанса (ЯМР)" сосредоточился в основном на генерации фактического, измеряемого сигнала, как так называемого FID-сигнала.

Мы продемонстрировали, как отдельные ядерные спины вносят вклад в общую намагниченность, которая выравнивается параллельно внешнему статическому магнитному полю  $\vec{B}_0$ . Затем ядерные спины прецессируют вокруг этого вектора статического магнитного поля с частотой, которая очень специфична для ядра. Эта частота называется ларморовской. Применимо следующее:

$$V_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad (1)$$

ВЧ-импульс в условиях резонанса (1), приложенный перпендикулярно внешнему статическому магнитному полю  $\vec{B}_0$  отклоняет общую намагниченность на угол  $\phi$ . Этот угол возбуждения сильно зависит от длительности импульса.

## Теория (2/20)

PHYWE

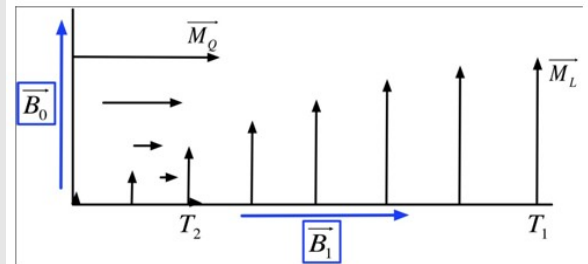
После каждого возбуждения под углом  $\phi$  вектор намагничивания можно разделить на часть, которая параллельна статическому магнитному полю и называется продольной намагниченностью  $\vec{M}_L(t)$ , и на перпендикулярную часть, которая называется поперечной намагниченностью  $\vec{M}_Q(t)$  и который прецессирует вокруг вектора поля в плоскости, перпендикулярной  $\vec{B}_0$ .

Например, высокочастотный импульс  $90^\circ$  преобразует начальную продольную намагниченность  $\vec{M}_{L0}(t)$  полностью в поперечную намагниченность  $\vec{M}_Q(0)$ . Важно отметить, что поперечные намагниченности  $\vec{M}_Q(t)$  в образце являются результатом фазовой синхронности ансамбля ядерных спинов. Если эта фазовая синхронность падает, поперечная намагниченность больше не может быть измерена.

## Теория (3/20)

PHYWE

Каждое отклонение означает, что состояние равновесия, т.е. прецессия вектора намагниченности вокруг статического магнитного поля  $\vec{B}_0$  отменяется. Релаксация описывает естественное, динамическое восстановление исходного состояния равновесия. Экспоненциальное восстановление продольной намагниченности  $\vec{M}_L(t)$  характеризуется временем релаксации  $T_1$ , а экспоненциальное затухание поперечной намагниченности  $\vec{M}_Q(t)$  описывается временем релаксации  $T_2$ .



Продольная и поперечная релаксация после ВЧ-импульса 90 °.

## Теория (4/20)

PHYWE

Применимо следующее:

$$M_L(t) = M_{L0}(t)(1 - ce^{-t/T_1}) \quad (2)$$

$$M_Q(t) = M_Q(0)e^{-t/T_2} \quad (3)$$

где  $M_{L0}$  в качестве силы начальной продольной намагниченности, константа  $c$  как состояние спинового ансамбля в начале релаксации ( $c = 1$ : насыщенность,  $c = 2$ : инверсия), и  $M_Q(0)$  как сила поперечная намагниченность сразу после ВЧ-импульса, приложенного с ларморовской частотой.

Исходя из геометрических соображений, постоянная  $c$  можно определить как

$$c = 1 - \cos\phi \quad (4)$$

## Теория (5/20)

PHYWE

Экспоненциально убывающая поперечная намагниченность - это фактический МР-сигнал, который можно обнаружить с помощью приемных катушек. Этот сигнал называется FID-сигналом (спад свободной индукции). Время  $T_2$  обычно меньше  $T_1$ .

$T_1$  релаксация вызвана так называемым спин-решеточным взаимодействием. Из-за случайного движения молекул отдельные ядерные спиновые диполи взаимодействуют с окружающей средой и передают энергию, например, кинетическую энергию атомам решетки окружающего вещества. (Окружение ядерного спинового диполя мы будем довольно часто называть решеткой, хотя на самом деле этот термин допускается только для твердых тел). Временное изменение этих взаимодействий сопровождается временным локальным изменением магнитного поля.

Если частота этих колебаний магнитного поля соответствует приблизительной частоте Лармора, то они действуют как малые ВЧ-импульсы и вызывают переворачивание спинов. В результате старое состояние равновесия снова быстро достигается в соответствии с распределением Больцмана. Вероятность и скорость этих "переворотов ядерных спинов" зависят от окружающего вещества, что приводит к различным релаксациям  $T_1$  в разных средах.

## Теория (6/20)

PHYWE

Теперь давайте еще раз взглянем на протоны водорода, которые необходимы для МР-технологии. В молекуле жира с относительно низкой подвижностью протоны довольно сильно чувствуют колебания магнитного поля.

В результате вероятность "переворота спина протона" сравнительно высока, т.е. жировая ткань связана с относительно коротким временем релаксации  $T_1$ . Разумеется, это же относится и к другим средам с низкой подвижностью, например, к протонам, которые прикреплены к белку.

Ситуация в жидкостях иная, поскольку молекулярное движение воды происходит намного быстрее, чем большинство колебаний магнитного поля. Это приводит к меньшей вероятности резонансов отдельных ядерных спинов с этими флуктуациями магнитного поля. Если они действительно возникают, они обычно слабее. В результате вероятность "переворота спина протона" сравнительно мала. Вот почему для чистой воды или спинномозговой жидкости характерно относительно длительное время релаксации  $T_1$ .



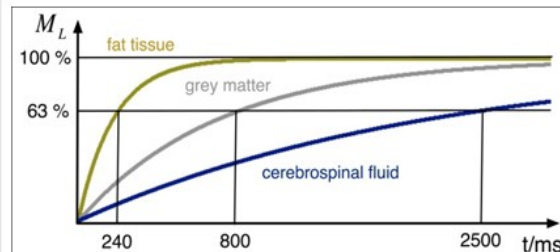
## Теория (7/20)

PHYWE

Кривые соответствуют временному изменению абсолютного значения продольной намагниченности после 90 ° ВЧ-импульса.

Видно, что жир очень быстро возвращается в состояние равновесия (вектор намагниченности параллельно  $\vec{B}_0$  это означает, что время релаксации  $T_1$  сравнительно невелико.

С другой стороны, цереброспинальная жидкость имеет значительно более длинное время релаксации  $T_1$ . Кривая релаксации масла аналогична кривой релаксации жира, а кривая релаксации воды аналогична кривой релаксации спинномозговой жидкости.



$T_1$  кривые релаксации для различных веществ

## Теория (8/20)

PHYWE

Подводя итог, можно констатировать, что время релаксации  $T_1$  соответствующее времени, необходимому для восстановления примерно 63% первоначального абсолютного значения продольной намагниченности, сильно зависит от размера и структуры молекул, окружающих протоны водорода, а также от их подвижности и вязкости (в зависимости от температуры).

Таким образом, используя взвешивание  $T_1$  можно создать контраст изображения, с помощью которого можно четко идентифицировать различные типы тканей. На типичном МРТ-изображении с взвешиванием по  $T_1$  спинномозговая жидкость (вода) намного темнее жира (масла). Этот контраст можно улучшить еще больше, поскольку диполи электронной оболочки также влияют на время релаксации  $T_1$ .

Парамагнитные загрязнения, например, приводят к укорачиванию  $T_1$ , поскольку диполи электронной оболочки являются гораздо более сильными магнитами, чем ядерные диполи. В результате они создают более сильные и далеко идущие помехи. В клинических применениях этот «эффект оболочки» в основном используется для визуализации кровеносных сосудов (ангиография). Для этого в основном используются комплексные соединения гадолиния.

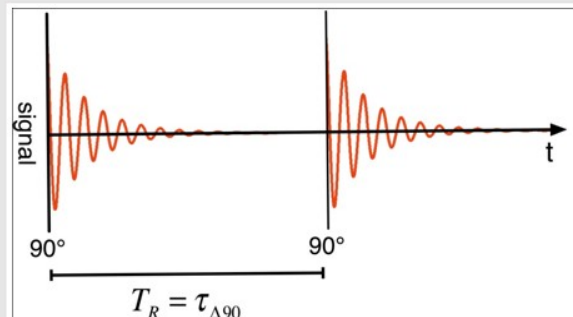
## Теория (9/20)

PHYWE

Теперь вопрос в том, как реально измерить описанные времена спин-решеточной релаксации  $T_1$ . Подходящим средством будет последовательность из двух  $90^\circ$  ВЧ-импульсов, разделенных определенным временем  $\tau_{\Delta 90}$ .

После первого импульса возбуждения под углом  $90^\circ$ , который генерирует сигнал FID, применяется второй импульс под углом  $90^\circ$  по истечении времени  $T_R = \tau_{\Delta 90}$ . Сила сигнала после второго импульса прямо пропорциональна продольной намагниченности  $\vec{M}_L(t)$ .

Изменяя  $\tau_{\Delta 90}$  можно сканировать кривую релаксации  $T_1$ . этой кривой приводит к времени релаксации  $T_1$  исследуемого вещества.



Последовательность импульсов для измерения кривой релаксации  $T_1$

## Теория (10/20)

PHYWE

Первый импульс отклонения перемещает вектор намагничивания в плоскость, перпендикулярную статическому магнитному полю  $\vec{B}_0$ . Через короткий промежуток времени ( $T_2^*$ ), происходит расфазировка ядерных спинов в перпендикулярной плоскости, а позже ( $T_1$ ) состояние равновесия восстанавливается, т.е. происходит релаксация вектора намагниченности в направлении статического магнитного поля  $\vec{B}_0$ .

Второй  $90^\circ$ -градусный импульс после времени  $\tau_{\Delta 90}$  теперь сканирует, чтобы увидеть, сколько ядерных спинов прецессируют еще раз в состоянии равновесия или, другими словами, на какой угол отклонился назад вектор намагниченности. Это означает, что амплитуда сигнала после второго  $90^\circ$  "импульса обнаружения" пропорциональна продольной намагниченности  $\vec{M}_L(t)$  непосредственно перед  $90^\circ$  "импульсом обнаружения".

## Теория (11/20)

PHYWE

Низкая амплитуда после короткого  $\tau_{\Delta 90}$  подразумевает высокую долю поперечного намагничивания  $\overrightarrow{M_Q(t)}$  и низкую долю продольной намагниченности  $\overrightarrow{M_L(t)}$  в общей намагниченности  $\overrightarrow{M_\phi(t)}$  перед импульсом обнаружения

$$\overrightarrow{M_\phi(t)} = \overrightarrow{M_Q(t)} + \overrightarrow{M_L(t)}.$$

Соответственно, высокая амплитуда после большого  $\tau_{\Delta 90}$  подразумевает низкую долю поперечного намагничивания  $\overrightarrow{M_Q(t)}$  и высокую долю продольной намагниченности  $\overrightarrow{M_L(t)}$  в общей намагниченности  $\overrightarrow{M_\phi(t)}$  до обнаружения импульса, т.е. почти полного расслабления.

## Теория (12/20)

PHYWE

Это означает, что варьируя время повторения  $\tau_{\Delta 90}$  можно определить типичную кривую релаксации  $T_1$  конкретного вещества. Программа FIT, которая подбирает экспоненциальную функцию к амплитудам измеряемых сигналов, позволяет рассчитать времена релаксации  $T_1$ . Для этого необходимо заранее подготовить сигналы (коррекция базовой линии, преобразование Фурье), чтобы гарантировать, что для FIT используются правильные значения амплитуды (прилагаемая программа измерения выполнит эту подготовку автоматически).

Первую оценку времени релаксации  $T_1$  можно получить очень простым методом. Во-первых, мы выбираем довольно большое значение  $\tau_{\Delta 90}$  (например, 20 с), чтобы получить приблизительную максимальную амплитуду после второго импульса обнаружения, т.е. амплитуду, которая соответствует полной релаксации продольной намагниченности  $\overrightarrow{M_L(t)}$  до второго импульса обнаружения.

## Теория (13/20)

PHYWE

Если теперь мы уменьшим  $\tau_{\Delta 90}$  и найдем значение, при котором амплитуда сигнала будет только примерно вдвое меньше, чем приблизительная максимальная амплитуда, это значение будет соответствовать грубой оценке периода полураспада спиновой решетки  $TR_{1/2}$ . Если мы определим амплитуду сигнала как  $A_\beta(t)$  применим типичный закон затухания:

$$A_\beta(t) = A_\beta^m(t) a x e^{\frac{t}{T_1}} \quad (5)$$

Это позволяет непосредственно оценить время релаксации. Следовательно:

$$T_1 = \frac{TR_{1/2}}{\ln 2} \quad (6)$$

## Теория (14/20)

PHYWE

Спин-решеточное взаимодействие также отвечает за релаксацию  $T_2$ , которая фактически описывает экспоненциальный спад поперечной намагниченности  $\overrightarrow{M_Q(t)}$ . Это становится очевидным, поскольку флуктуирующие магнитные поля, близкие к ларморовской частоте, изменяют спиновые состояния протонов. В результате фазовая когерентность спинового ансамбля и, тем самым, измеримая поперечная намагниченность  $\overrightarrow{M_Q(t)}$  также исчезает.

Что касается релаксации поперечной намагниченности, существует также другое взаимодействие, которое отвечает за обычно более короткое время релаксации  $T_2$  по сравнению со временем релаксации  $T_1$ . Это так называемое спин-спиновое взаимодействие. Изменение спинового состояния всегда означает небольшое локальное изменение магнитного поля. Соседние протоны ощущают это изменение ( $\approx 1$  мТ), что приводит к незначительным изменениям их частот прецессии. В локальном диапазоне эти частоты разбегаются примерно на 40 кГц вокруг нормальной ларморовской частоты. Частотные вариации соседних ядерных спинов приводят к дефазированию, и измеримое поперечное намагничивание сравнительно быстро исчезает.

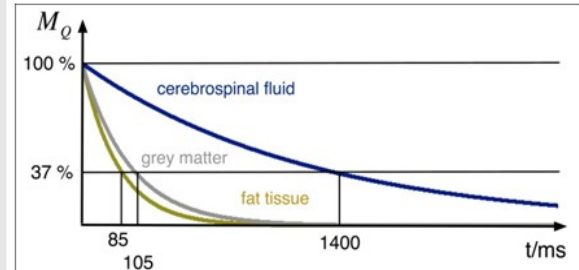
## Теория (15/20)

PHYWE

Дополнительная дефазировка, основанная на спин-спиновых взаимодействиях, зависит от окружающего вещества, что приводит к различной релаксации  $T_2$  в разных средах.

В жидкостях (например, в воде или спинномозговой жидкости),  $T_2$  относительно длинное (в случае с чистыми жидкостями, оно иногда почти такое же как  $T_1$ ).

В твердых или полутвердых материалах (например, в жирах или биологических тканях),  $T_2$  в большинстве случаев явно короче, чем  $T_1$ .



Кривые релаксации  $T_2$  для различных веществ

## Теория (16/20)

PHYWE

Подводя итог, можно сказать, что время релаксации  $T_2$ , которое соответствует времени, необходимому для затухания приблизительно 63% первоначального абсолютного значения поперечной намагниченности, зависит - как и время релаксации  $T_1$  - сильно от размера и структура молекул, которые окружают протоны водорода, а также их подвижность и вязкость (в зависимости от температуры).

Таким образом, с помощью взвешивания  $T_2$  можно создать контраст изображения, с помощью которого можно четко идентифицировать различные типы тканей.

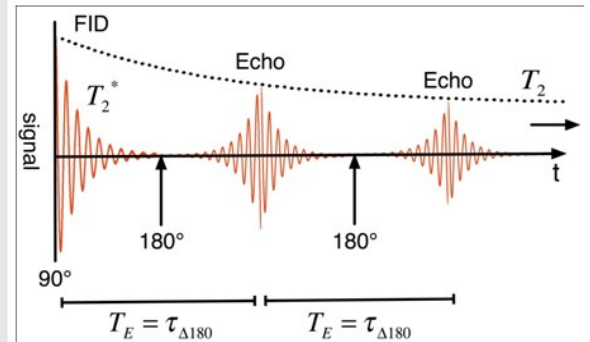
Например, на типичном  $T_2$  - Взвешенное изображение МРТ, например, спинномозговая жидкость (вода) намного легче, чем жировая ткань (масло). В конце концов, остается вопрос, как реально измерить времена спин-спиновой релаксации  $T_2$ . Обычно для этой цели используется последовательность из одного импульса под углом  $90^\circ$  и нескольких импульсов под углом  $180^\circ$ .

## Теория (17/20)

PHYWE

После первого импульса возбуждения под углом  $90^\circ$ , который генерирует сигнал FID, после времени  $T_S$  применяется импульс  $180^\circ$ . Этот импульс генерирует сигнал спинового эха по прошествии времени  $2T_S = T_E = \tau_{\Delta 180}$ . Его амплитуда пропорциональна поперечной намагниченности  $\overrightarrow{M_Q(t)}$ .

Если используется последовательность с множеством эхо, кривую релаксации  $T_2$  можно сканировать за одно измерение. Экспоненциальный FIT этой кривой приводит к времени релаксации  $T_2$  исследуемого вещества.



Последовательность импульсов для измерения кривой релаксации  $T_2$

## Теория (18/20)

PHYWE

В этом контексте следует еще раз пояснить назначение и эффект 180-градусного импульса. В "Основах ядерного магнитного резонанса" мы видели, что после фазового отклонения в плоскость, перпендикулярную вектору внешнего статического магнитного поля  $\overrightarrow{B_0}$  ансамбль ядерного спина переходит в фазу с  $T_2^* < T_2$  за время  $T_2^*$ . Это происходит из-за чисто статических неоднородностей поля, постоянных во времени и пространстве. Они вызывают расхождение фаз ансамбля ядерных спинов по определенной схеме.

Однако эту систематическую дефазировку можно обратить вспять. Если импульс  $180^\circ$  применяется после времени  $T_S$  то есть если весь ансамбль разветвленных вращений перевернут на  $180^\circ$  (сравните концепцию "перевернутого омлета"), то самое быстрое вращение 1 догонит самое медленное вращение  $n$  спустя какое-то время  $2 \cdot T_S = T_E$ .

## Теория (19/20)

PHYWE

Именно в этот момент восстанавливается начальная фазовая синхронность спинового ансамбля. Восстановленный МР-сигнал называется спин-эхом. Сам сигнал спинового эха уменьшается с увеличением  $T_2$ , а его амплитуда уменьшается с увеличением  $T_2$ . Это означает, что расфазировку из-за чистого спин-спиновой и спин-решеточного взаимодействия можно наблюдать непосредственно на основании амплитуды сигнала спинового эха.

Теперь ясно, как можно определить кривую релаксации  $T_2$ . Вместо второго импульса  $90^\circ$  мы просто используем импульс  $180^\circ$  в качестве импульса обнаружения (сравните кривую релаксации  $T_1$  и, таким образом, классический сигнал спинового эха в качестве сигнала обнаружения, который указывает значение поперечной намагниченности  $\overrightarrow{M_Q(t)}$  которое уже затухло в момент времени  $T_E$  спинового эха.

Затем изменение времени эха  $T_E$  дает типичную кривую релаксации  $T_1$  для конкретного вещества. Подпрограмма FIT, которая, как и в случае кривой релаксации, подгоняет экспоненциальную функцию к амплитудам измеряемого сигнала при различных временах эхо-сигнала  $T_E$  позволяет рассчитать время релаксации  $T_2$ .

## Теория (20/20)

PHYWE

Чтобы определить кривую релаксации  $T_2$ , нет необходимости проводить несколько измерений с варьирующими параметрами  $T_E$  чтобы получить большой набор точек данных. Одного измерения с несколькими эхо-сигналами, которые повторяются после установленного времени эхо-сигнала  $T_E = \tau_{\Delta 180}$  вполне достаточно. Такая последовательность известна как последовательность мультиэхо или турбо спин-эхо (TSE).

Каждая амплитуда определенного спинового эха приводит к появлению точки данных на кривой релаксации  $T_2$  (n.TE). Процедуру экспоненциальной FIT можно снова использовать для определения времени релаксации  $T_2$ .

Аналогично оценке  $T_1$ , для оценки  $T_2$  достаточно найти время  $TE_{1/2}$  эхо-сигнала, при котором амплитуда эхо-сигнала соответствует половине начальной амплитуды сигнала FID. Тогда к оценке  $T_2$  применимо следующее:

$$T_2 = \frac{TE_{1/2}}{\ln 2} \quad (7)$$

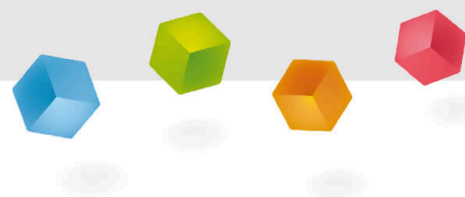
## Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	Компактный магнитно -резонансный томограф, МРТ.	09500-99	1



PHYWE

## Подготовка и выполнение работы



### Подготовка (1/3)



Установка тренировочного модуля MPT

Установите тренировочный МР-блок. Убедитесь, что установка используется в сухом и защищенном от пыли помещении и не подвержена вибрации. Доступ к сетевому выключателю и штепсельному разъему блока должен быть свободным. Убедитесь, что вентиляционные отверстия не заблокированы и не закрыты.

Соблюдайте достаточное безопасное расстояние от другого технического оборудования и носителей информации, так как на их работу могут оказывать влияние сильные магниты. Удалите все металлические предметы, находящиеся в непосредственной близости от устройства.

## Подготовка (2/3)

Убедитесь, что переключатель POWER на блоке управления выключен. Подключите блок управления через разъем питания (12 В пост. тока, 2 А) к источнику питания. Обязательно используйте предназначенный для этого источник питания.

Подключите блок управления и магнит с помощью градиентного кабеля и кабеля BNC, предназначенного для этой цели (см. рис. 2). Затем подключите USB-интерфейсы блока управления и измерительного компьютера с помощью высокоскоростного кабеля USB 2.0 (см. рис. 3). Включите прибор с помощью тумблера POWER (MP-блок следует включать только для проведения экспериментов).



Разъемы на задней панели блока управления

## Подготовка (3/3)

При первом запуске устройства операционная система компьютера распознает блок управления. Затем установите драйвер устройства и программное обеспечение для измерений (см. Инструкции по установке).

Запустите программное обеспечение "Измерение МРТ".

**Примечание:** Подробную информацию о работе MP-блока, а также о работе с образцами в камере для МР-образов можно найти в соответствующих инструкциях по эксплуатации.



Рис 2: Подключение магнита и блока управления

Разъемы магнитов и блоков управления

## Выполнение работы (1/7)

PHYWE

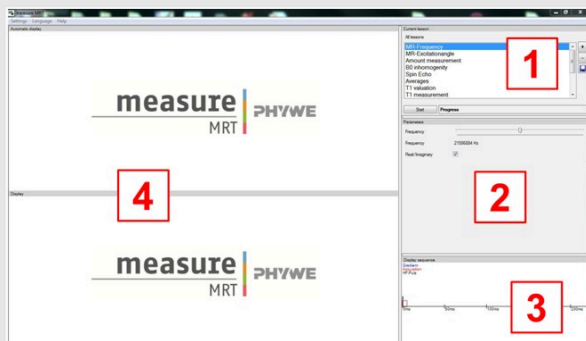


Рис. 4: Области программы "Измерение MRT"

При запуске программы "Измерение MRT" автоматически открывается окно

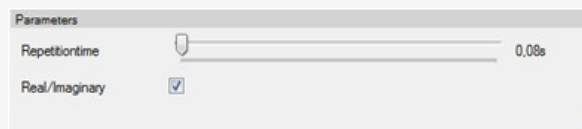
В области 1 можно выбрать эксперименты (область экспериментов). Соответствующие параметры отображаются в области 2 (область параметров). В области 3 отображается последовательность отображения выбранного эксперимента (область последовательностей). Наконец, результаты отображаются в области 4 (область результатов).

Все эти области можно расположить в окне как угодно. Индивидуальное расположение может быть сохранено для будущих измерений через с помощью программы "Настройка".

## Выполнение работы (2/7)

### А: Оценка времени релаксации $T_1$

- Поместите образец воды диаметром 10 мм в камеру для образцов устройства. В области экспериментов (уроки) выберите урок "Оценка  $T_1$ ". В области параметров отображаются параметры настройки "Время повторения" и "Действительный/Мнимый". измените с помощью ползунка время повторения между двумя ВЧ-импульсами  $90^\circ$ . Время повторения (интервал между двумя измерениями с одним импульсом  $90^\circ$  ВЧ каждый).



Оценка  $T_1$  - параметры

## Выполнение работы (3/7)

PHYWE

- Сначала установите время повторения на очень высокое значение (например, 15 с) и измерьте амплитуду сигнала. Затем уменьшите время повторения до тех пор, пока амплитуда сигнала не станет наполовину меньше.

**СОВЕТ:** Уменьшите время повторения с 15 с до примерно 2 с, а затем решите, нужно ли с этого момента увеличить или уменьшить время повторения. Рассчитайте время релаксации  $T_1$  воды на основе конечного значения скорректированного времени повторения (соответствует периоду полураспада спин-решеток).

- Замените образец воды толщиной 10 мм на образец масла толщиной 10 мм и повторите точки 1 и 2. Рассчитать время релаксации  $T_1$  масла.

**Примечание:** Запишите время релаксации  $T_1$  для воды и масла. Эти оценки параметров очень полезны для правильного проведения других экспериментов.

## Выполнение работы (4/7)

PHYWE

### В: Измерение времени релаксации $T_1$

- Поместите образец масла толщиной 10 мм в камеру для образцов прибора. В области экспериментов (уроки) выберите урок "Измерение  $T_1$ ". В области параметров отображаются параметры настройки "Время повторения", "Шаг времени" и "Количество точек". Измените время повторения между двумя измерениями (одно измерение включает два последовательных импульса  $90^\circ$ ) с помощью ползунка "Время повторения", шаг приращения времени для увеличения интервала между двумя ВЧ-импульсами  $90^\circ$  в последовательных измерениях с помощью ползунка "Шаг времени" и количество последовательных измерений с помощью ползунка "Количество точек".

Parameters	
Repetitiontime	0.3s
Timestep	15ms
Number of points	15

Измерение  $T_1$  - параметры

## Выполнение работы (5/7)

PHYWE

- Настройте все ползунки так, чтобы на экране можно было видеть адекватную экспоненциальную кривую. Эта кривая является частью кривой времени релаксации  $T_1$  масла. СОВЕТ: Используйте вычисленное время релаксации части А.
- Время повторения должно быть как минимум в три раза больше расчетного значения  $T_1$  образца. Шаг времени и количество точек должны быть установлены таким образом, чтобы в конце суммарного измерения эффективное время между двумя импульсами под углом  $90^\circ$  соответствовало, по крайней мере, значению оценки  $T_1$ . **Примечание:** Большое количество точек данных и небольшой временной шаг всегда обеспечивают более надежный результат.
- Установите записанный ход сигнала с помощью экспоненциальной кривой  $\alpha - be^{-x/T_1}$ . Для этого щелкните правой кнопкой мыши по графику и выберите "Оценка/ Абсолют". Затем выберите  $T_1$  FIT и нажмите на "Подборка данных". Подбираемые параметры можно прочесть непосредственно на диаграмме. Замените образец масла толщиной 10 мм на образец воды толщиной 10 мм и повторите точки 1 и 2. Сравните параметры  $a$ ,  $b$  и  $T_1$  для масла и воды.
- **Примечание:** Запишите подобранные значения времени релаксации для воды и масла. Эти параметры очень полезны для правильной работы других экспериментов.

## Выполнение работы (6/7)

PHYWE

### С: Измерение времени релаксации $T_2$

- Поместите образец масла толщиной 10 мм в камеру для образцов прибора. В области экспериментов (уроки) выберите урок "Измерение  $T_2$ ". В области параметров отображаются параметры настройки "Количество эхо-сигналов" и "Время эхо-сигнала". Измените количество сгенерированных эхо-сигналов с помощью ползунка "Количество эхо-сигналов" и временной интервал между двумя последовательными эхо-сигналами с помощью ползунка "Время эхо-сигнала".
- Настройте все ползунки так, чтобы на экране можно было видеть адекватную экспоненциальную кривую. Эта кривая является частью кривой релаксации  $T_2$  масла.

Parameters	
Number of echos	45
Echotime	3ms

Измерение  $T_2$  - параметры

## Выполнение работы (7/7)

PHYWE

- СОВЕТ: количество приблизительно 250 эхо-сигналов и время эхо-сигнала приблизительно 2 мс уже дают довольно хорошую экспоненциальную кривую. Примечание: более длительное время эха приводит к искусственной и нежелательной дефазировке из-за особой последовательности измерений. В результате время релаксации  $T_2$  изменяется в сторону значительно меньших значений. Вот почему время эха-сигнала должно быть как можно короче.
- Установите записанный ход сигнала с помощью экспоненциальной кривой  $ae^{-x/T_2} + c$ . Для этого щелкните правой кнопкой мыши по графику и выберите "Оценка/ Абсолют". Затем выберите  $T_2$  FIT и нажмите на "Подборка данных". Установленные параметры можно прочесть непосредственно на диаграмме. Замените образец масла толщиной 10 мм на образец воды толщиной 10 мм и повторите точки 1 и 2. Увеличить количество эхо-сигналов и, при необходимости, также время эха-сигнала. Сравните установленные параметры  $a$ ,  $c$  и  $T_2$  для масла и воды.

**Примечание:** Обратите внимание на установленные значения времени релаксации  $T_2$  воды и масла. Эти параметры очень полезны для правильного проведения других экспериментов.

## Оценка (1/17)

PHYWE

### А: Оценка времени релаксации $T_1$

1. Изучите влияние времени повторения двух ВЧ-импульсов  $90^\circ$  на записанный сигнал.
  - На рисунках а-с показан сигнал измерения после второго  $90^\circ$  ВЧ-импульса образца воды толщиной 10 мм для трех разных времен повторения  $T_R = \tau_{\Delta 90}$ . Время повторения указывает точный интервал между двумя импульсами. Сигнал очень слабый в случае очень короткого времени повторения, что означает, что вода должна иметь время релаксации  $T_1$ , которое значительно превышает 1 с.
  - Видно, что после второго  $90^\circ$  ВЧ-импульса сигнал является наименьшим для самого короткого времени повторения (а) и что он возрастает с увеличением времени повторения (b, c). Это напрямую связано с сравнительно большим временем релаксации воды.

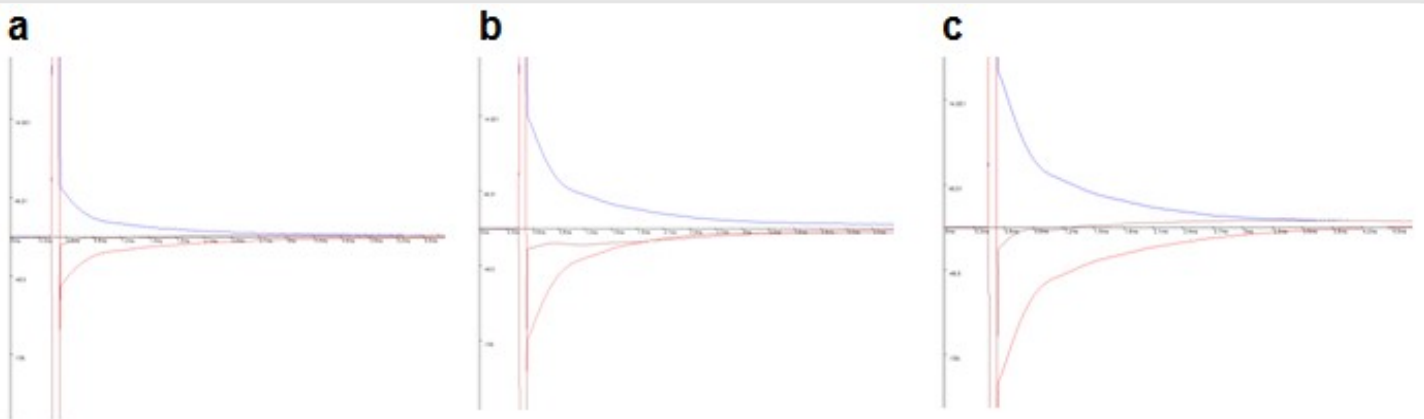
## Оценка (2/17)

PHYWE

- Если второй ВЧ-импульс применяется до достижения состояния равновесия, то есть до того, как вектор намагниченности снова станет почти параллельным внешнему статическому магнитному полю  $\vec{B}_0$  второй ВЧ-импульс не приводит к полному отклонению всех ядерных спинов в плоскость, перпендикулярную  $\vec{B}_0$ .
- В результате значение вектора поперечного намагничивания  $\vec{M}_Q(t)$  меньше, и сигнал слабее. Это означает, что измеряемый сигнал прямо пропорционален величине релаксированной продольной намагниченности  $\vec{M}_L(t)$ .

## Оценка (3/17)

PHYWE



Сигнал измерения после второго из двух  $90^\circ$  ВЧ-импульсов образца воды толщиной 10 мм для трех разных времен повторения  $T_R = \tau_{\Delta 90}$ . (a)  $T_R = 1\text{с}$  (b)  $T_R = 5\text{с}$  (c)  $T_R = 16\text{с}$

## Оценка (4/17)

PHYWE

2. Уменьшите время повторения до тех пор, пока амплитуда записанного сигнала не будет приблизительно соответствовать примерно половине максимальной амплитуды, и используйте приблизительный период полураспада спин-решеток для расчета приблизительного времени релаксации воды.

Если время повторения установлено приблизительно на 15 с, можно получить хорошую оценку максимальной амплитуды после второго импульса  $90^\circ$ . Это означает, что более длительное время повторения практически не вызывает каких-либо изменений амплитуды сигнала после второго  $90^\circ$ -градусного импульса. После уменьшения времени повторения примерно до 2 с измеренная амплитуда сигнала соответствует приблизительно половине максимальной амплитуды. Настроенное таким образом время повторения является периодом полураспада спин-решетки  $TR_{1/2}$  воды.

Затем используйте уравнение (6):

$$T_1 \approx 2.9 \text{ с}.$$

## Оценка (5/17)

PHYWE

3. Сравните предполагаемое время релаксации воды и масла и прокомментируйте ваши результаты.

На рис. а-с показан сигнал измерения после второго  $90^\circ$  ВЧ-импульса образца масла толщиной 10 мм для тех же трех повторений  $T_R = \tau_{\Delta 90}$  как показано на рисунках в задаче 1. Разница в амплитуде сигнала после второго импульса  $90^\circ$  практически отсутствует. Это означает, что масло достигает состояния равновесия уже после сравнительно короткого времени релаксации, т.е. вектор намагничивания снова почти параллелен внешнему статическому магнитному полю  $\vec{B}_0$  гораздо быстрее, чем в случае с водой. Второй импульс затем приводит к отклонению почти всех ядерных спинов в плоскость, перпендикулярную к  $\vec{B}_0$  для всех трех времен повторения.

В результате абсолютное значение вектора поперечной намагниченности и, следовательно, записанный сигнал почти идентичны после второго  $90^\circ$  импульса для всех трех времен повторения.



## Оценка (6/17)

PHYWE

Подобно задаче 2, можно оценить время релаксации масла. Однако в случае масла время повторения должно быть установлено на гораздо меньшее значение. Примерно через 0,08 секунды измеренная амплитуда сигнала соответствует половине максимальной амплитуды. Это скорректированное таким образом время повторения является периодом полураспада спин-решетки  $TR_{1/2}$  масла.

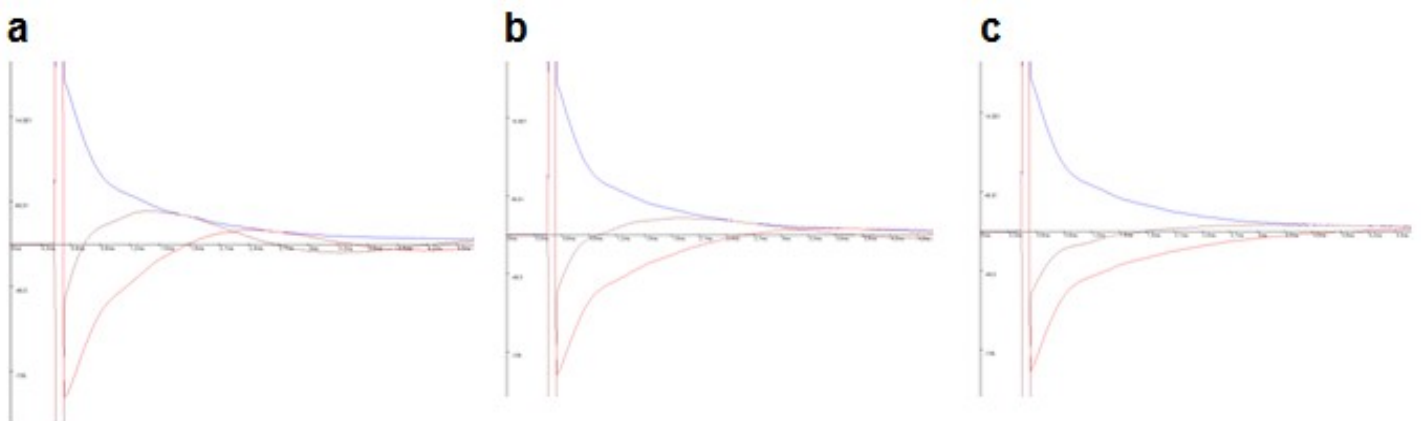
Затем используйте уравнение (6):

$$T_1 \approx 0.115c.$$

Это расчетное время релаксации  $T_1$  масла

## Оценка (7/17)

PHYWE



Сигнал измерения после второго из двух  $90^\circ$  ВЧ-импульсов образца масла толщиной 10 мм для трех различных времен повторения  $T_R = \tau_{\Delta 90}$ . (a)  $T_R = 1c$  (b)  $T_R = 5c$  (c)  $T_R = 16c$

## Оценка (8/17)

PHYWE

**В: Измерение времени релаксации  $T_1$** 

1. Запишите экспоненциальную кривую релаксации  $T_1$  масла. Изучите влияние времени повторения, шага времени и количества точек на эту кривую релаксации.

В этой части эксперимента время повторения - это время между отдельными измерениями, которые формируются двумя 90-градусными ВЧ импульсами. Это показывает, что для получения адекватной кривой релаксации  $T_1$  время повторения должно быть выбрано таким образом, чтобы спиновой ансамбль снова был почти в состоянии равновесия для нового измерения, то есть чтобы вектор намагниченности снова указывал в направлении внешнего статического магнитного поля.  $\vec{B}_0$  (см. часть А). (см. Часть А). Если выбранное время повторения недостаточно велико, первый сигнал FID. измерения уже будет слабее, так как вектор намагниченности не будет полностью отклоняться в плоскость, перпендикулярную  $\vec{B}_0$

## Оценка (9/17)

PHYWE

Как следствие, сигнал после второго ВЧ-импульса в рамках отдельного измерения также будет искажен и больше не будет обеспечивать точное значение кривой релаксации  $T_1$  в момент второго сигнала. Конечно, время измерения больше в случае более длительного времени повторения. Тем не менее, время повторения должно быть установлено, по крайней мере, в три раза больше расчетного значения  $T_1$  исследуемого вещества, поскольку к этому моменту примерно 95% первоначальной продольной намагниченности уже восстановлено.

Интервал между двумя 90-градусными импульсами в последовательных измерениях варьируется в зависимости от временного шага. От одного измерения к другому интервал между двумя импульсами 90 ° увеличивается точно на этот временной шаг. Детальное сканирование релаксационной кривой  $T_1$  требует небольшого временного шага. Тем не менее, в конце измерения кривую релаксации следовало сканировать до времени релаксации  $T_1$  чтобы было возможно хорошее экспоненциальное FIT. Это означает, что чем больше сканирование должно быть детальным, тем больше измерений (количество точек) должно быть сгенерировано.

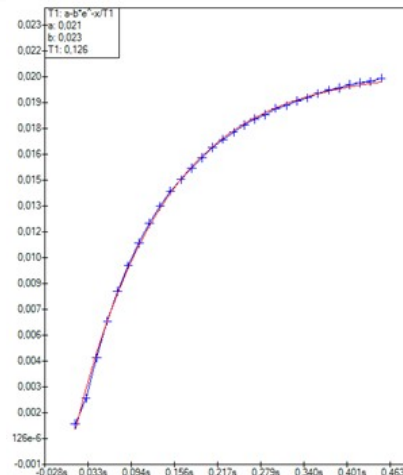
## Оценка (10/17)

PHYWE

2. Запишите идеальную кривую релаксации  $T_1$  и сопоставьте ход сигнала с программой FIT, реализованную в программном обеспечении. Считайте время релаксации  $T_1$  масла и распечатайте график.

Время повторения установлено на 0,5 с, количество точек данных - на 30, шаг времени - на 15 мс. Алгоритм FIT подгоняет экспоненциальную функцию  $a - b \cdot e^{-x/T_1}$  к точкам данных. Найденные таким образом параметры  $a = 0.021$ ,  $b = 0.023$  и  $T_1 = 0.126$  с. Обратите внимание:  $a$  и  $b$  всегда должны быть примерно одинаковыми. Это происходит из-за ВЧ-возбуждения под углом  $90^\circ$  ( $\zeta = 1$ , см. уравнение (2)).

$T_1 = 126$  мс - это время релаксации масла.



Экспоненциальная FIT кривая релаксации  $T_1$  масла

## Оценка (11/17)

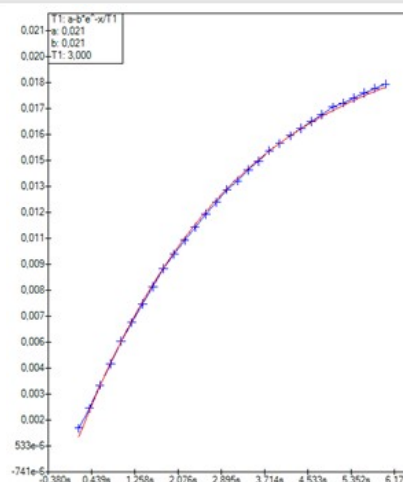
PHYWE

3. Повторите эти измерения для воды. Считайте время релаксации  $T_1$  воды на соответствующей кривой FIT и распечатайте график.

Время повторения установлено на 10 с, количество точек данных - на 30, а шаг времени - на 200 мс. Алгоритм FIT подгоняет экспоненциальную функцию  $a - b \cdot e^{-x/T_1}$  к точкам данных.

Найденные таким образом параметры  $a = 0.021$ ,  $b = 0.021$  и  $T_1 = 3$  с.

$T_1 = 3$  мс - это время релаксации воды.



Экспоненциальная аппроксимация кривой релаксации  $T_1$  воды

## Оценка (12/17)

PHYWE

### С: Измерение времени релаксации $T_2$

1. Изучите влияние времени и количества эхо-сигналов на экспоненциальную кривую релаксации  $T_2$  масла

Цель этой части - определить время релаксации  $T_2$ , веществ с помощью последовательности нескольких эхо-сигналов. Каждое спиновое эхо является сигналом обнаружения оставшейся части поперечной намагниченности  $\overrightarrow{M_Q(t)}$  в процессе релаксации. Он отделяется от следующего спинового эха по времени эха  $T_E = \tau_{\Delta 180}$

Это ясно показывает, что для точного сканирования кривой релаксации  $T_2$ , требуется большое количество эхо-сигналов и короткое время эхо-сигнала. Опять же, сканирование должно проводиться приблизительно до  $T_2$ , времени релаксации исследуемого вещества, чтобы обеспечить хороший экспоненциальный FIT. Это означает, что чем более детальным должно быть сканирование, тем больше должно генерироваться эхо-сигнал.

## Оценка (13/17)

PHYWE

Примечание: Более длительное время эха-сигнала приводит к искусственной и нежелательной дефазировке из-за специальной последовательности измерения.

В результате время релаксации  $T_2$ , изменяется в сторону значительно меньших значений. Если время эхо-сигнала  $T_E$ , выбрано неправильно, экспоненциальный FIT приведет к неверным результатам.  $T_2$ , можно найти на основе метода оценки согласно уравнению (7).

Примечание: в отличие от случая измерения времени релаксации  $T_1$ ,  $T_2$ , уже может быть определено путем однократного измерения, состоящего из последовательности нескольких эхо-сигналов.

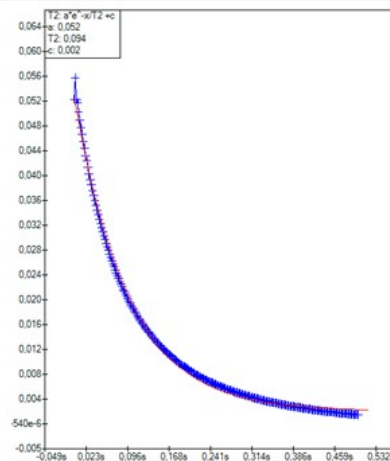
## Оценка (14/17)

PHYWE

2. Запишите идеальную кривую релаксации  $T_2$  и установите ход сигнала с помощью процедуры *FIT*, реализованной в программном обеспечении. Считайте время релаксации  $T_2$  масла и распечатайте график.

В этом случае время эхо-сигнала было установлено на 2 мс, а количество эхо-сигналов - на 250. Алгоритм FIT подбирает экспоненциальную функцию  $c + a \cdot e^{-x/T_2}$  к точкам данных. Найденные таким образом параметры  $a = 0.052$ ,  $c = 0.002$ , и  $T_2 = 0.094$  с.

$T_2 = 94$  мс - время релаксации масла.



Экспоненциальная FIT кривой релаксации  $T_2$  масла

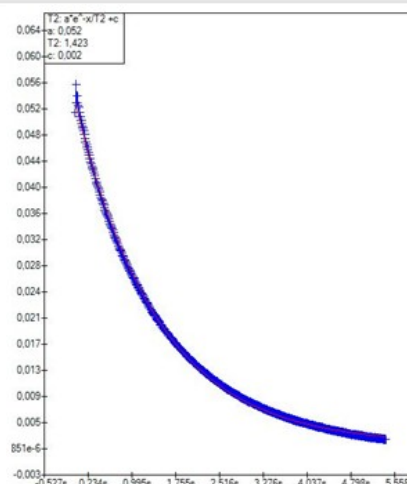
## Оценка (15/17)

PHYWE

3. Повторите эти измерения для воды. Прочитайте время релаксации  $T_2$  воды на соответствующей кривой FIT и распечатайте график.

В этом случае время эхо-сигнала было установлено на 12 мс, а количество эхо-сигналов - на 450. Алгоритм FIT соответствует экспоненциальной функции  $c + a \cdot e^{-x/T_2}$  к точкам данных. Найденные таким образом параметры:  $a = 0.052$ ,  $c = 0.002$ , и  $T_2 = 1.423$  с.

$T_2 = 1.423$  с - время релаксации воды.



Экспоненциальная FIT кривой релаксации  $T_2$  масла

## Оценка (16/17)

PHYWE

Какие из следующих утверждений верны относительно времени релаксации  $T_1$  ?

- ☐ Время релаксации  $T_1$  относительно велико в твердой среде.
- ☐ Время релаксации  $T_1$  относительно велико в жидкой среде
- ☐ Это зависит от размера и структуры молекул, а также от их подвижности и вязкости.
- ☐ Это вызвано спин-решеточным взаимодействием.

✓ Проверить

## Оценка (17/17)

PHYWE

Правда или ложь?

Благодаря спин-спиновому взаимодействию, время релаксации  $T_2$  обычно меньше времени релаксации  $T_1$  как в твердых, так и в жидких веществах.

☐ правильно

☐ неправильно

✓ Проверить

## Вопрос (1/3)

PHYWE

**А: Оценка времени релаксации**

1. Что описывается временами релаксации  $T_1$  и  $T_2$  ?
2. Почему время релаксации  $T_1$  больше, чем время релаксации  $T_2$  ?
3. Когда первоначальная продольная намагниченность была восстановлена примерно на 95% после приложения  $90^\circ$  ВЧ-импульса? ? Используйте формулу  $M_L(t) = M_{L0}(1 - ce^{-t/T_1})$  при  $c = 1$ .
4. Выведите общую корреляцию  $c = 1 - \cos\phi$ , где  $\phi$  - это угол отклонения вектора намагниченности от его исходной прецессии вокруг статического магнитного поля  $\vec{B}_0$ .
5. Почему можно определить время релаксации  $T_1$ , с помощью второго ВЧ-импульса  $90^\circ$  после первичного ВЧ-возбуждения  $90^\circ$  ?

## Вопрос (2/3)

PHYWE

**В: Измерение времени релаксации  $T_1$** 

1. Почему можно сделать вывод об угле возбуждения вектора намагниченности из экспоненциального FIT.  $a - be^{-x/T_1}$  от  $T_1$  кривой релаксации T1 (см. вопросы в А)?
2. Каков точный эффект спин-решеточного взаимодействия? Почему время релаксации жира (масла) короче, чем время релаксации  $T_1$  спинномозговой жидкости (воды)?
3. Как можно использовать разное время релаксации  $T_1$  разных веществ для МРТ? Как выбрать время повторения, чтобы получить высокий контраст  $T_1$  между разными веществами? Почему короткое время повторения связано с очень низким уровнем сигнала?

## Вопрос (3/3)

PHYWE

С: Измерение времени релаксации  $T_2$ 

1. Каков точный эффект спин-спинового взаимодействия? Почему время релаксации  $T_2$  жира (масла) короче, чем время релаксации  $T_2$  спинномозговой жидкости (воды)?
2. Как можно использовать разное время релаксации  $T_2$  в разных веществ для МРТ? Как следует выбрать время повторения и время эха, чтобы получить высокий контраст  $T_2$  контраст между различными веществами?

Слайд	Оценка / Всего
Слайд 56: время релаксации	0/3
Слайд 57: Взаимодействие спин-спин	0/1

Общий балл  0/4

Показать решения



Вспомнить